

El mundo de los astrónomos y de los físicos ha acogido con sobresalto los recientes descubrimientos de quasars, pulsars y agujeros negros. Ello ha hecho que se incrementara también el interés por la teoría de la relatividad, íntimamente ligada a estos fenómenos astronómicos.
En esta obra, Martin Gardner nos invita, de forma clara, amena y brillante, a un «paseo» por el Universo tal y como nos lo muestran las teorías de Einstein.

Martin Gardner es uno de los más célebres escritores sobre temas científicos. Durante más de veinte años, Gardner ha tenido a su cargo una sección de matemática en *Scientific American*, la revista de divulgación científica más leída en el mundo. Entre sus numerosos libros, *Miscelánea matemática* y una antología de textos, *El escarabajo sagrado*, forman parte de la Biblioteca Científica Salvat.

La explosión de la relatividad

M. Gardner

51





La explosión de la relatividad

Martin Gardner

Biblioteca
Científica
Salvat







La explosión de la relatividad

Biblioteca
Científica
Salvat

EX LIBRIS Scan Digit



The Doctor

Libros, Revistas, Intereses:
http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/

La explosión de la relatividad

Martin Gardner

SALVAT

Versión española de la obra original norteamericana *The Relativity Explosion*, publicada por Random House de Nueva York

Traducción: Jordi Vilá
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

© 1994 Salvat Editores, S.A., Barcelona
© Martin Gardner (Texto)
© Anthony Ravielli (Ilustración)
ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8931-1 (Volumen 51)
Depósito Legal: B-20178-1994
Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a., Julio 1994
Printed in Spain

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN IX
I. ¿ABSOLUTO O RELATIVO? 1
II. EL EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY . . . 11
III. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL (I) . . 33
IV. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL (II) . 55
V. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL . . . 75
VI. GRAVEDAD Y ESPACIO-TIEMPO 93
VII. CONTRASTACIONES DE LA RELATIVIDAD GENERAL 113
VIII. EL PRINCIPIO DE MACH 127
IX. LA PARADOJA DE LOS MELLIZOS 135
X. MODELOS COSMOLÓGICOS 151
XI. QUASARS, PULSARS Y AGUJEROS NEGROS 173
XII. EL PRINCIPIO Y EL FIN 187

Para Billie,
un pariente.

INTRODUCCIÓN

Ésta es una versión revisada y puesta al día de mi libro *Relativity for the Million,* publicado en 1962. Se han añadido dos capítulos enteramente nuevos: el capítulo 7, en el que se habla de las últimas contrastaciones de la teoría de la relatividad general de Einstein, y el capítulo 11, en el que se da cuenta de tres fantásticos nuevos descubrimientos astronómicos —pulsars, quasars y posibles agujeros negros— que están íntimamente relacionados con la teoría de la relatividad. El último capítulo se ha ampliado en gran manera para hacer una necrología de la teoría cosmológica del Universo estacionario y dar mayor relieve a los modelos pulsantes más en boga en la actualidad. En él se indica cómo la visión de John Archibald Wheeler de un Universo que emerge de un superespacio, se expande, se contrae y vuelve a entrar en este superespacio, es, de hecho, una sofisticada ampliación de un modelo que ya había sido propuesto por Edgar Allan Poe. En fin, a lo largo de toda la obra se han hecho extensas revisiones.

Se habían escrito ya tantos libros de divulgación antes de 1962 que el lector quizá se pregunte cuál pudo ser el propósito que me movió a escribir uno nuevo. He aquí tres razones:

1. Las mejores introducciones a la relatividad elemental se escribieron mucho antes de 1962 y todas ellas estaban en-

tonces ya un tanto desfasadas. Se habían hecho tantos y tan apasionantes descubrimientos que incidían en la teoría de la relatividad que estaba convencido de que había llegado la hora de escribir un nuevo libro de introducción que incluyera todo este material.

2. Constituía un verdadero reto explicar una vez más, de forma sencilla y entretenida, los aspectos fundamentales de la revolucionaria teoría de Einstein. ¿Qué quiso decir Einstein cuando escribió «Newton, perdóname»? En mi opinión, quien no entienda todavía lo que quiso decir ha tenido una educación tan deficiente como quien, hace cien años, no supiera nada de las contribuciones de Isaac Newton a la ciencia. Yo mismo ansiaba aprender más sobre la relatividad. ¿Existe un medio mejor de aprender un tema por uno mismo que escribir un libro sobre él?

3. Ningún libro de divulgación sobre relatividad ha sido ilustrado tan cuidadosamente. La brillante aportación gráfica de Anthony Ravielli por sí sola justifica la edición de la obra.

Acaso el lector se esté preguntando por qué el libro no contiene ningún capítulo sobre las consecuencias filosóficas de la teoría. La razón es que estoy convencido de que, en el sentido ordinario de la palabra "filosófico", la relatividad *no tiene* absolutamente ningún tipo de consecuencias. En la teoría del conocimiento y la filosofía de la ciencia sus implicaciones son evidentes, debido principalmente a la demostración de que la estructura matemática del espacio y del tiempo no pueden determinarse si no es mediante la observación y los experimentos. Sin embargo, en lo que se refiere a los grandes temas de la filosofía —Dios, la inmortalidad, el libre albedrío, el bien y el mal, etc.—, la relatividad no tiene en absoluto nada que decir. La idea de que la física relativista apoya, por ejemplo, la supresión de juicios de valor en antropología o un relativismo con respecto a los valores morales, es absurda.

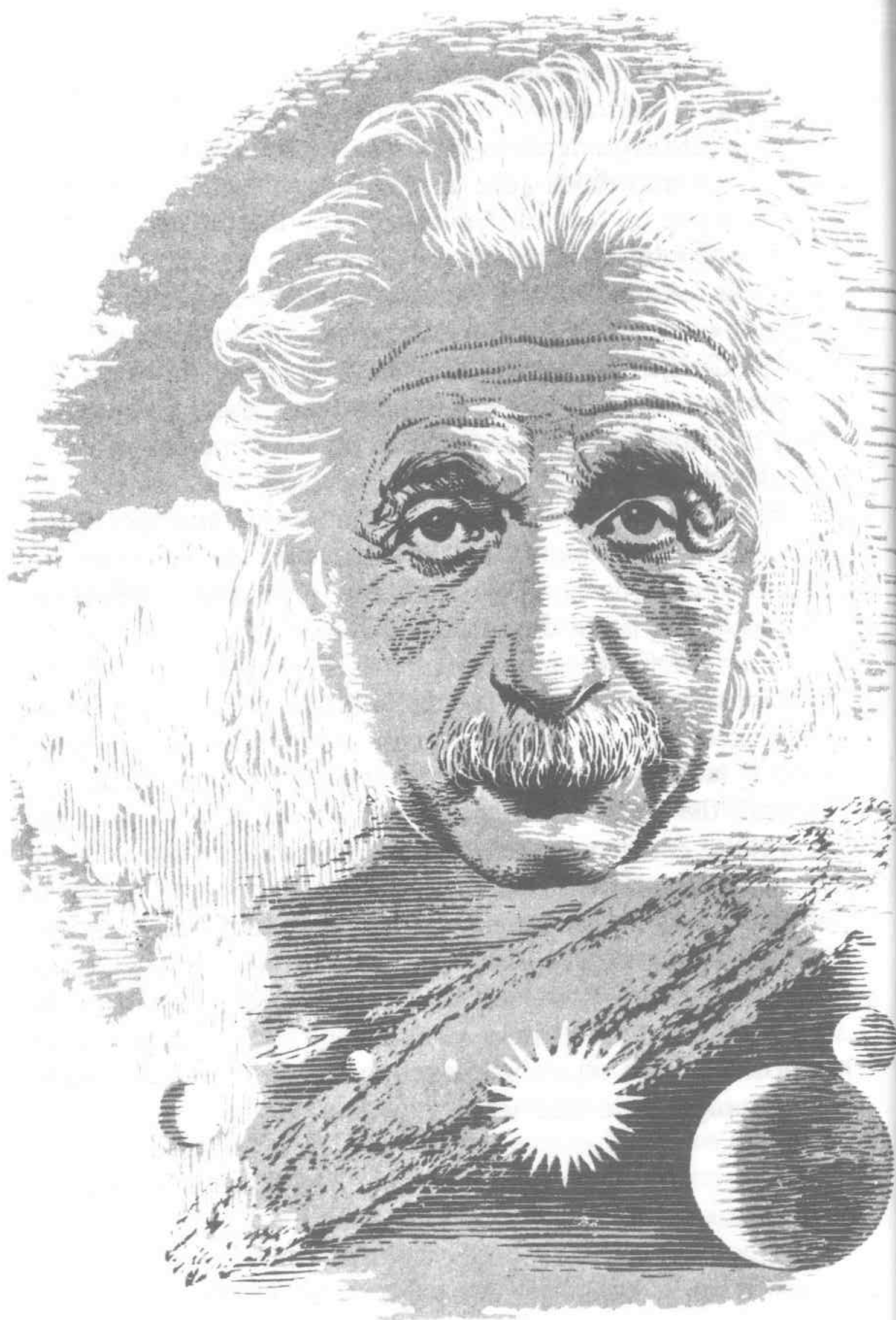
De hecho, la teoría de la relatividad introduce una nueva serie completa de "absolutos".

Se suele argumentar a menudo que la teoría de la relatividad hace más difícil aceptar que fuera de nuestras pobres mentes existe un "mundo inmenso" con una estructura ordenada susceptible de ser descrita, al menos en parte, por leyes científicas. «A medida que el tema [la relatividad] se iba desarrollando», escribe el astrónomo inglés James Jeans en su libro *The Growth of Physical Science,* «se hizo evidente que los fenómenos de la naturaleza estaban determinados por nosotros y por nuestra experiencia, y no por un Universo mecánico independiente situado fuera de nosotros.»

El idealismo de Jeans constituye una actitud metafísica completamente respetable y hay aspectos de la mecánica cuántica que lo justifican. Sin embargo, no recibe el más mínimo apoyo por parte de la teoría de la relatividad. No voy a hablar aquí de este tema, que ha sido tratado con detalle por casi todos los filósofos de la ciencia actuales. El lector interesado encontrará una discusión particularmente clara en el capítulo 7 (titulado "Metaphysical Interpretation of Relativistic Physics") del libro de Philipp Frank, *Philosophy of Science.*

¿No es acaso una actitud enormemente narcisista pretender que nosotros, los seres humanos, con nuestros toscos y pequeños cerebros tan recientemente separados de los cerebros de los animales, somos de alguna manera responsables de la creación del Universo? Nada podría estar más lejos de la actitud humilde de Einstein que se pone de manifiesto en la hermosa cita que reproducimos a continuación y que constituye el epígrafe de este libro.

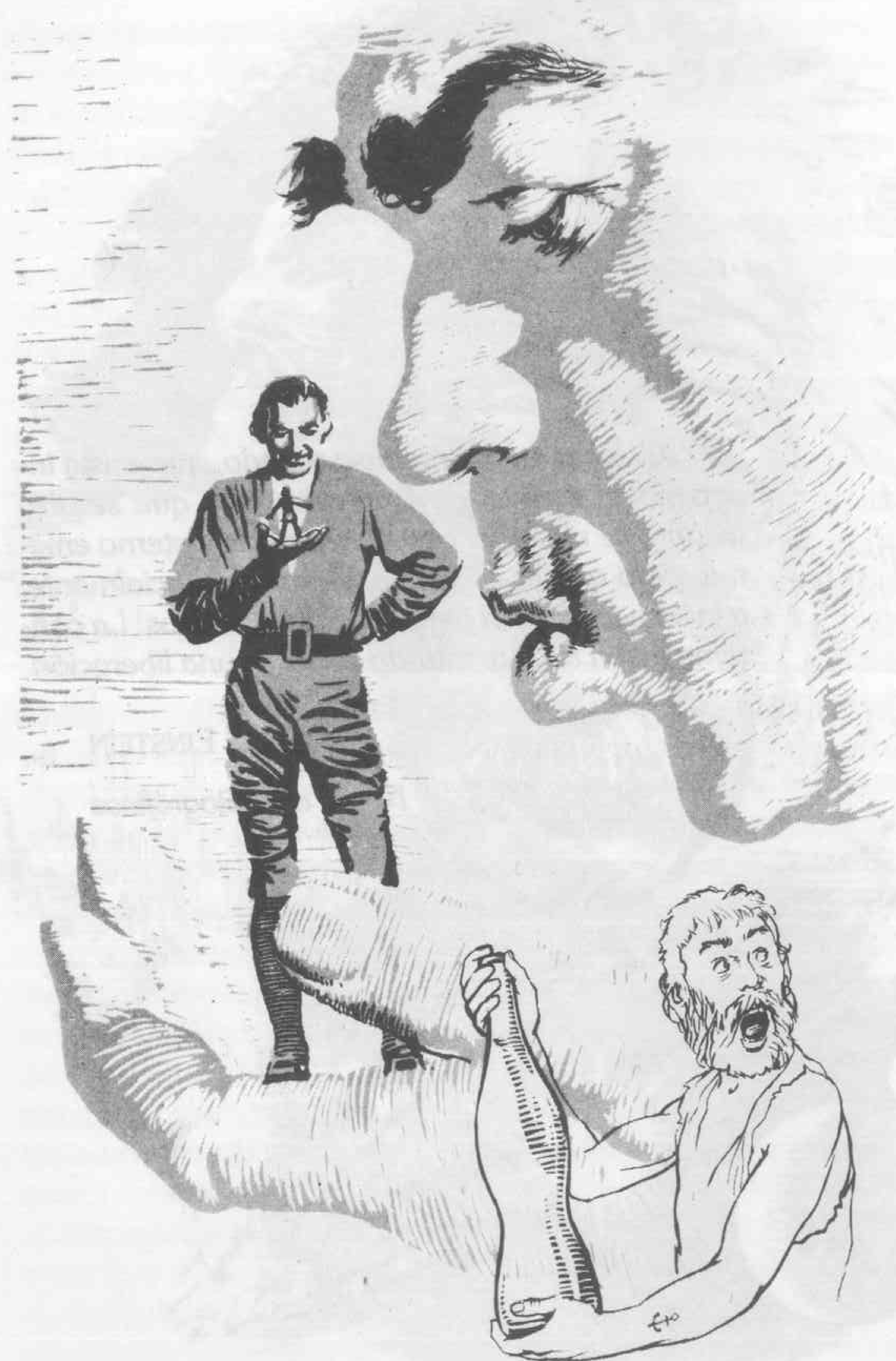
MARTIN GARDNER



Allí estaba este inmenso mundo, que existe independientemente de los hombres y que se alza delante de nosotros como un grande y eterno enigma, pero que es accesible, al menos parcialmente, a la inspección y al pensamiento humanos. La contemplación de este mundo es como una liberación.

ALBERT EINSTEIN

Notas autobiográficas



I. ¿ABSOLUTO O RELATIVO?

Dos marineros, Joe y Moe, supervivientes de un naufragio se encuentran en una isla desierta. Transcurren varios años. Un buen día Joe encuentra una botella que ha sido arrastrada hasta la playa por las olas. Se trata de una de esas nuevas botellas de Coca-Cola de gran tamaño. Joe empalidece.

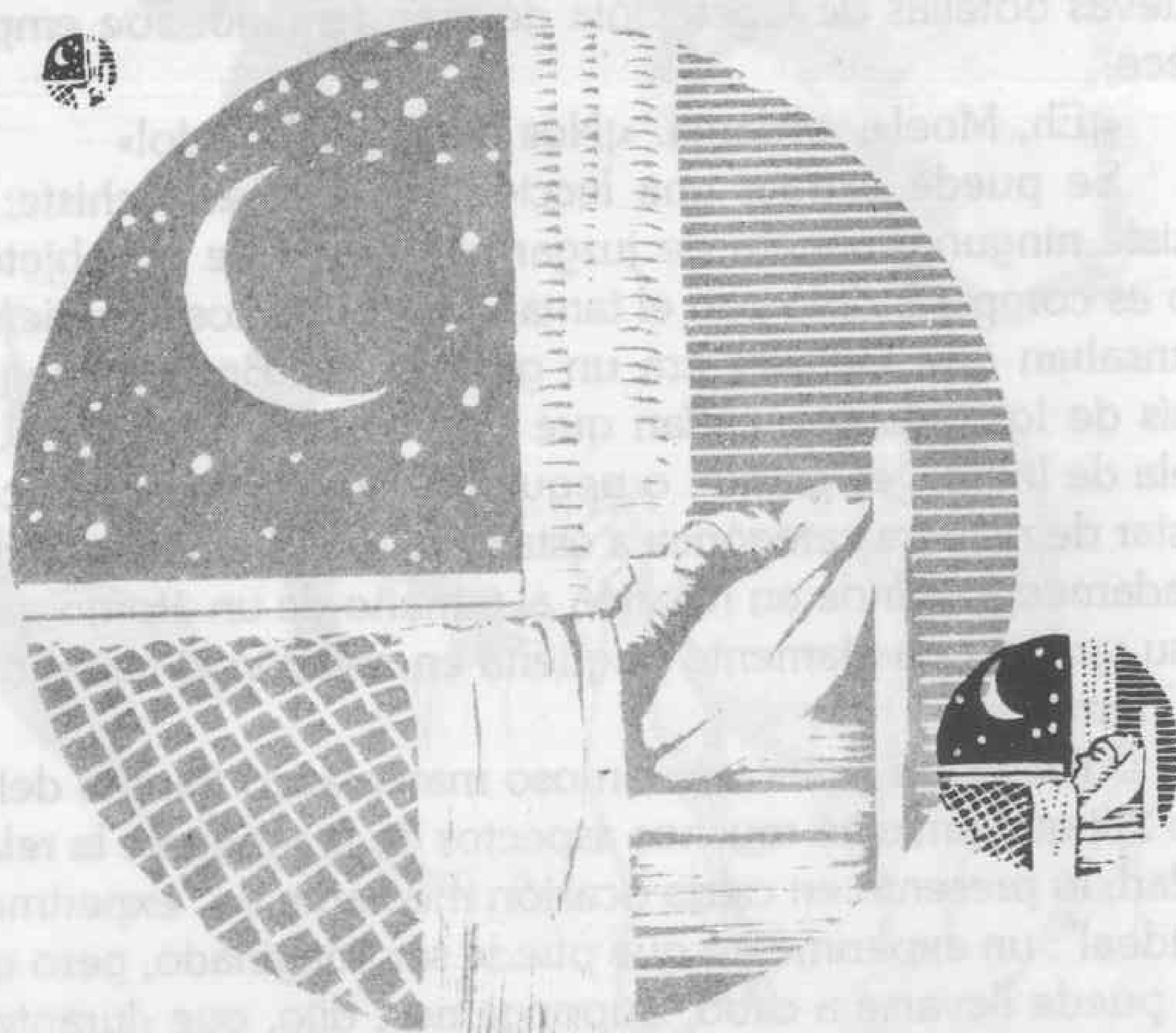
«¡Eh, Moe!», exclama. «¡Nos hemos encogido!»

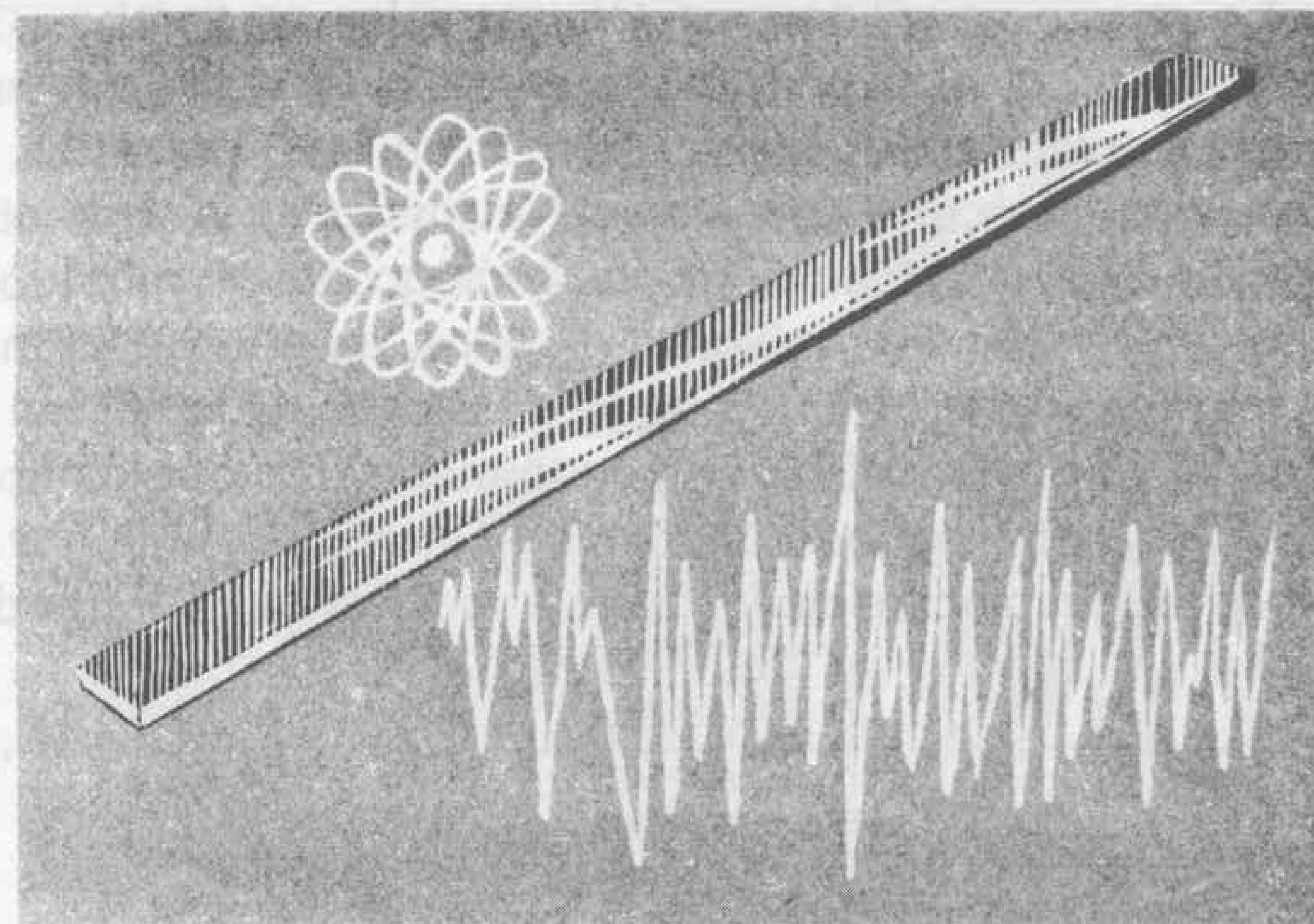
Se puede extraer una lección seria de este chiste: no existe ninguna manera de juzgar el tamaño de un objeto si no es comparándolo con el tamaño de otro. Los liliputienses pensaban que Gulliver era un gigante. En Brobdingnag, el país de los gigantes, creían que Gulliver era diminuto. Una bola de billar, ¿es grande o pequeña? No hay forma de contestar de manera categórica a esta pregunta. La bola es extremadamente grande en *relación* al tamaño de un átomo, pero a su vez extremadamente pequeña en *relación* al tamaño de la Tierra.

Jules Henri Poincaré, famoso matemático francés del siglo XIX que anticipó muchos aspectos de la teoría de la relatividad, lo presentó en cierta ocasión mediante un "experimento ideal": un experimento que puede ser imaginado, pero que no puede llevarse a cabo. Supongamos, dijo, que durante la noche, mientras estamos dormidos, todo en el Universo

se hiciera mil veces más grande. Cuando dice todo, Poincaré quiere decir *todo:* electrones, átomos, longitudes de onda, nosotros mismos, nuestra cama, nuestro hogar, la Tierra, el Sol y las estrellas. Cuando despertáramos, ¿seríamos capaces de descubrir el cambio?, es decir, ¿podríamos realizar algún experimento que demostrara que nuestro tamaño es distinto?

Según Poincaré, no existe tal experimento. De hecho, el Universo parecería el mismo que antes. Incluso carecería de sentido decir que se había hecho más grande. "Más grande" quiere decir más grande en relación a otra cosa. En el caso del Universo no existe esta "otra cosa" con que compararlo. De igual forma, carecería completamente de sentido decir que el tamaño del Universo había disminuido.

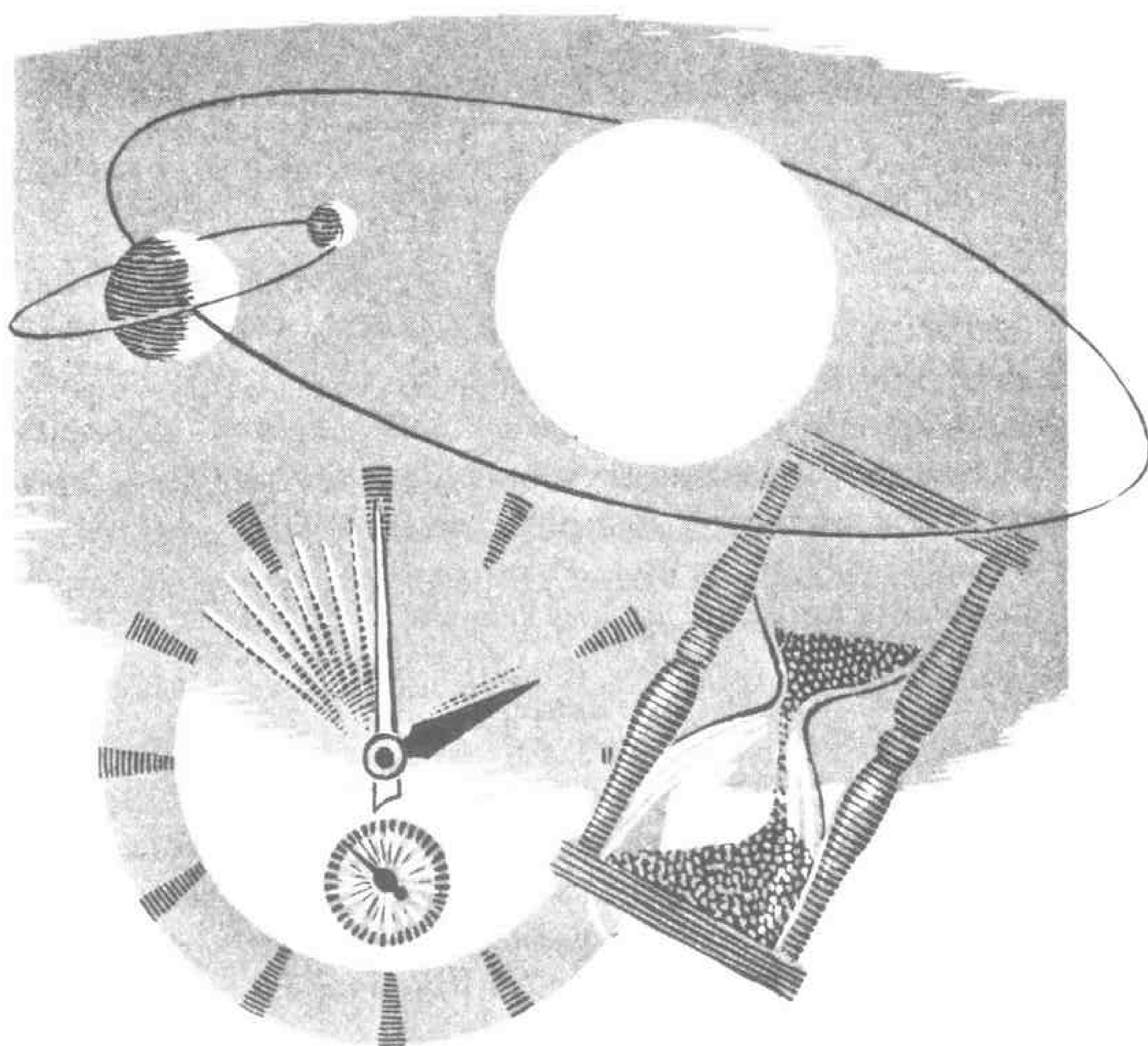




El tamaño, por tanto, es relativo. No existe una manera *absoluta* de medir un objeto y decir que tiene este o el otro tamaño absoluto. Solamente puede medirse comparándolo con el tamaño de otros objetos, tales como una barra de un metro de longitud. Pero, ¿qué es un metro? Antes del 1 de enero de 1962, un metro se definía como la longitud de una cierta barra de platino que se mantenía a temperatura constante en Sèvres, Francia, donde se encuentra la sede de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas. Desde esa fecha, la nueva medida patrón para el metro es 1.650.763,73 veces la longitud de onda de un cierto tipo de radiación de color anaranjado emitida en el vacío por el átomo de criptón 86*. Desde luego, si todo en el Universo tuviera que hacerse más grande o más pequeño en la misma proporción, incluyendo la longitud de onda de esta radiación, no dispondríamos de ningún método experimental para detectar el cambio.

* En 1983, en la XVII Conferencia General de Pesas y Medidas, se adoptó la siguiente definición del metro: «Un metro es la longitud recorrida por un rayo de luz en el vacío durante una fracción de segundo igual a 1/299792458.» *(N. del T.)*

Lo mismo es válido para los intervalos de tiempo. ¿Es "largo" o es "corto" el tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta completa alrededor del Sol? A un niño pequeño, el tiempo que transcurre desde unas Navidades a las siguientes le parece una eternidad. Para un geólogo, acostumbrado a pensar en términos de millones de años, un año no es más que un fugaz instante. Un período de tiempo, al igual que la distancia en el espacio, no se puede medir más que comparándolo con otro período de tiempo. Un año se mide por el período de revolución de la Tierra alrededor del Sol; un día





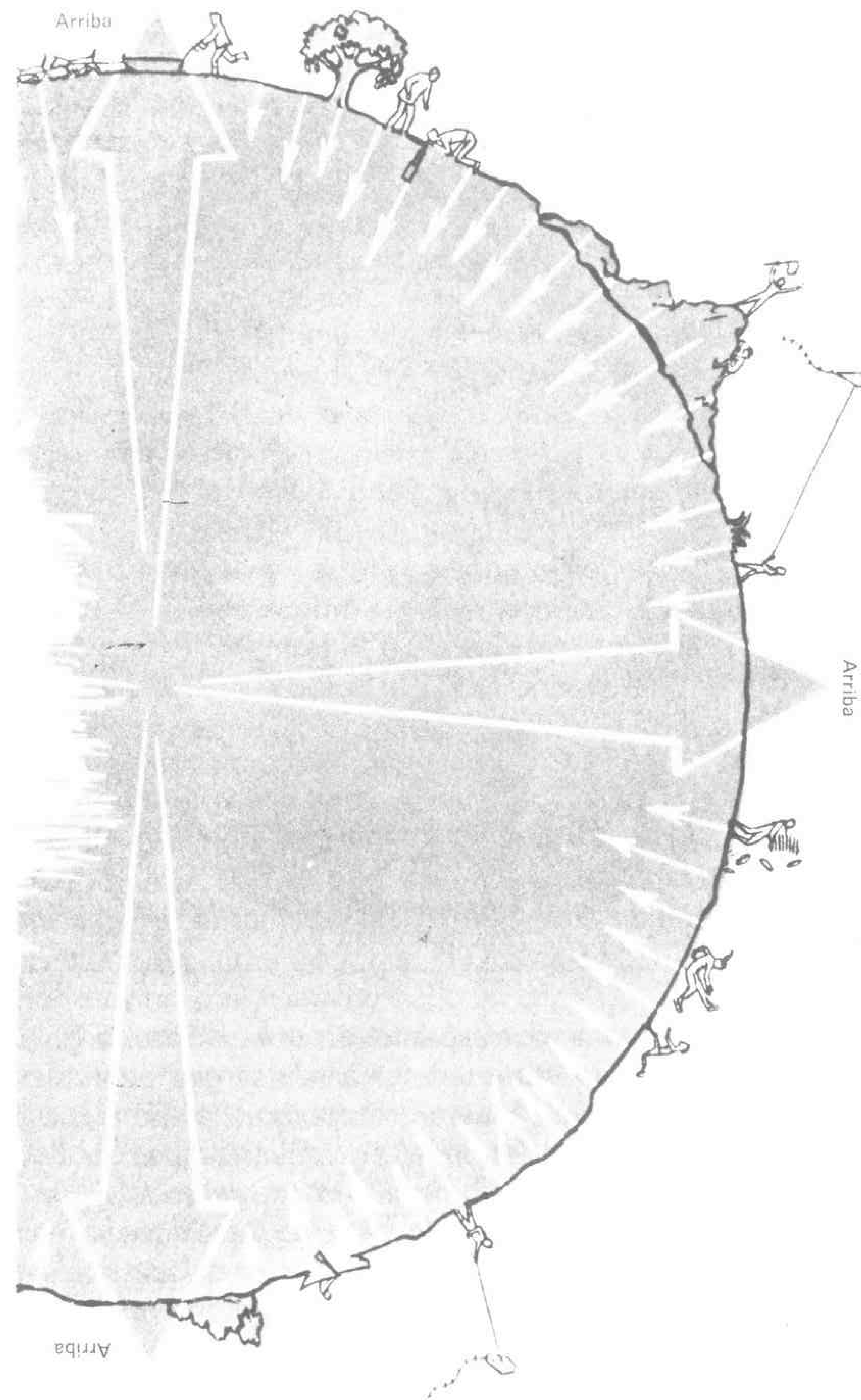
por el tiempo que invierte la Tierra en dar una vuelta completa alrededor de su propio eje; una hora por el tiempo que tarda la minutera de un reloj en completar una vuelta. Siempre se mide un período de tiempo comparándolo con otro.

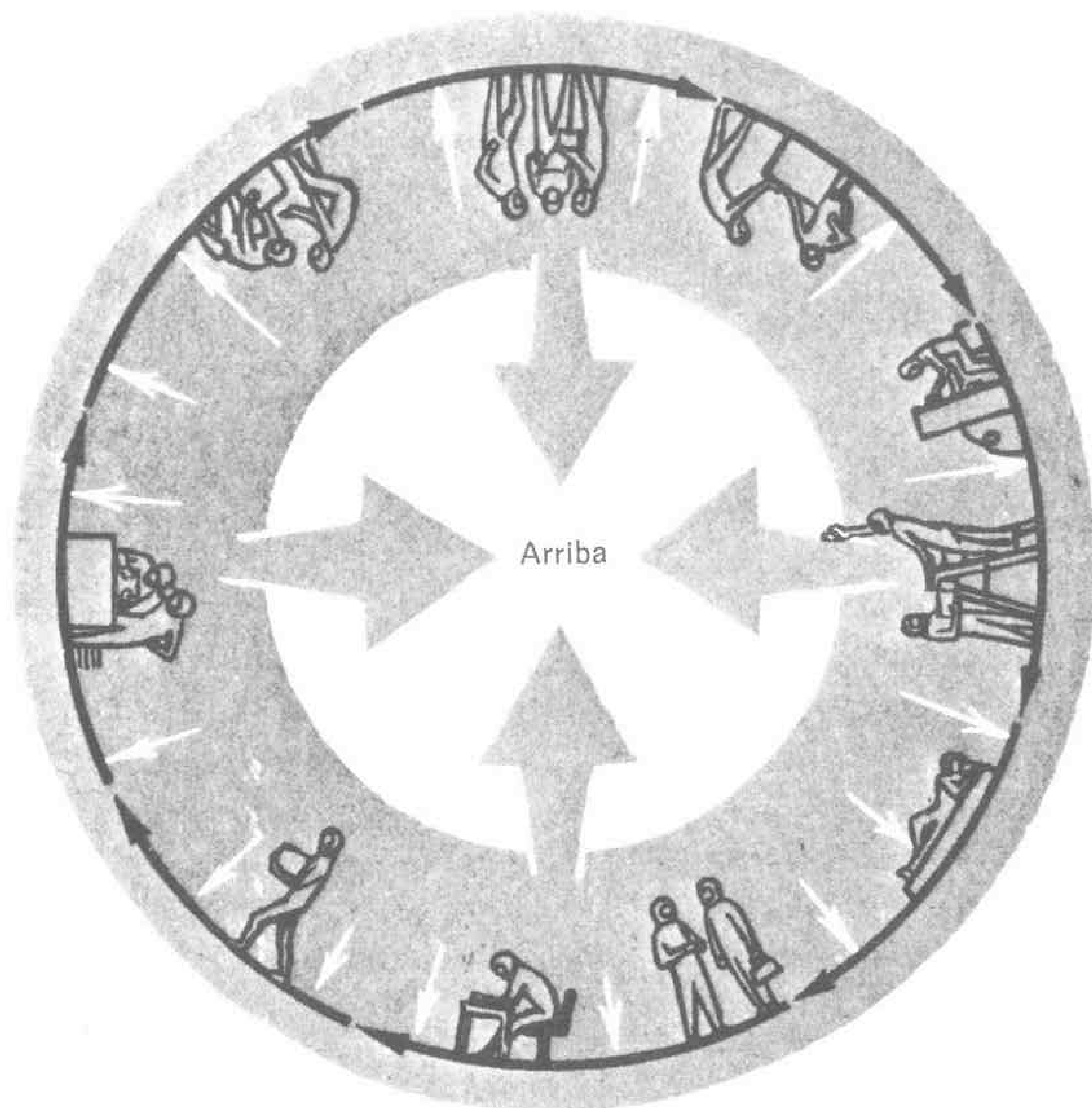
Hay un famoso relato de ciencia ficción de H. G. Wells, *The New Accelerator,* cuya moraleja es la misma que la del cuento de los dos marineros, excepto que ahora se trata del tiempo en lugar del espacio. Un científico descubre un modo de acelerar todos los procesos de su organismo. Su corazón late más rápidamente, su cerebro trabaja más deprisa, etc. Se

puede adivinar lo que le va a suceder. El mundo parece detenerse para él. El científico se ve obligado a moverse muy despacio a fin de que el rozamiento con el aire no prenda fuego a sus pantalones. La calle se llena de estatuas humanas. Un hombre queda inmovilizado en el acto de guiñar un ojo a dos chicas que pasan. En el parque, una banda de música produce sonidos entrecortados de tonos muy graves. Una abeja zumba en el aire a la velocidad de una tortuga.

Pensemos en otro experimento ideal. Supongamos que en un cierto instante todo en el Universo empieza a moverse a menor o a mayor velocidad, o incluso que se detiene por completo durante unos cuantos millones de años para ponerse en marcha a continuación. ¿Será perceptible el cambio? La respuesta es negativa. No existe ningún experimento mediante el cual pueda detectarse. De hecho, decir que tal cambio hubiera ocurrido carecería de sentido. El tiempo, como la distancia en el espacio, es relativo.

Otros muchos conceptos que nos son familiares en la vida diaria son relativos. Consideremos, por ejemplo, los conceptos de “arriba” y “abajo”. En tiempos pasados la gente no podía comprender por qué los hombres que viven en el lado opuesto de la Tierra no caen. Los niños todavía se plantean la misma dificultad cuando les dicen por primera vez que la Tierra es redonda. Si la Tierra estuviera hecha de cristal transparente y pudiéramos mirar directamente a través de ella con la ayuda de un telescopio, podríamos, de hecho, ver gente cabeza abajo, con sus pies pegados al suelo. Esto es, parecerían estar cabeza abajo *respecto a nosotros.* Desde luego, para *ellos* seríamos *nosotros* los que estaríamos cabeza abajo. En la Tierra, “arriba” es la dirección que se aleja del centro de la Tierra. “Abajo” es hacia el centro de la Tierra. En el espacio interestelar no existe un arriba o un abajo absolutos, ya que no existe ningún planeta disponible que nos sirva de “referencia”.





Imaginemos una nave espacial que cruza el Sistema Solar. Imaginémosla como una rueda gigante que gira de manera que la fuerza centrífuga crea un campo gravitatorio artificial. Dentro de la nave, los astronautas pueden caminar sobre el borde exterior de la rueda como si se tratara del suelo. En este contexto, "abajo" quiere ahora decir *hacia fuera* desde el centro de la nave, mientras que "arriba" quiere decir *hacia el centro* de la misma: justamente el criterio opuesto al que usamos en un planeta en rotación.

De manera que, como se puede ver, no existen "arribas" ni "abajos" absolutos en el Universo. Arriba y abajo son direcciones relativas a la dirección en que actúa un campo gravitacional. No tendría ningún sentido decir que, mientras estábamos dormidos, el Cosmos se volvió de arriba abajo, puesto que no existe nada que pueda servirnos de referencia para determinar su nueva posición.

Otro tipo de cambio relativo es el cambio de un objeto respecto de su imagen especular. Si una *R* mayúscula se imprime al revés, *Я*, se la reconoce inmediatamente como la imagen de una *R* en un espejo. Sin embargo, si de repente el Universo entero (incluyéndole a usted) se convirtiera en su imagen especular, no habría ninguna manera de detectar el cambio. Desde luego, si una persona se convierte en su imagen (H. G. Wells escribió también un relato sobre esto, *The Plattner Story*) mientras el resto del Universo permanece invariable, le parecerá que el resto del Universo se ha invertido. Deberá sostener un libro frente a un espejo para leerlo, del mismo modo que Alicia detrás del espejo se las arreglaba para leer las palabras de "Jabberwocky" escritas al revés sosteniendo el poema delante de un espejo. Sin embargo, si *todo* se invirtiera, no existiría ningún experimento que permitiera detectar el cambio. Tendría tan poco sentido hablar de esta inversión como decir que el Universo se había colocado boca abajo o que había doblado su tamaño.

¿Es absoluto el movimiento?, es decir, ¿existe alguna clase de experimento que determine positivamente cuándo un cuerpo se mueve o cuándo permanece en reposo, o, por el contrario, el movimiento es otro concepto relativo que sólo puede medirse comparando un objeto con otro? ¿Hay algo peculiar en el movimiento, algo que lo hace distinto a los conceptos relativos que hemos considerado hasta ahora?

Antes de pasar al siguiente capítulo, deténgase por un momento a reflexionar cuidadosamente sobre estas pregun-

tas. Buscando la respuesta a este tipo de cuestiones, Einstein llegó a su famosa teoría de la relatividad. Esta teoría es tan revolucionaria, tan contraria al sentido común, que incluso hoy día existen miles de científicos (incluyendo físicos) que tienen tanta dificultad en comprender los conceptos básicos de la teoría como la tiene un niño pequeño en comprender por qué la gente al otro lado de la Tierra no se cae de la misma.

Si usted es joven, tiene una gran ventaja sobre estos científicos. Su mente todavía no ha logrado esos profundos surcos a través de los cuales se obliga a pasar a los pensamientos. Pero cualquiera que sea su edad, si tiene la firme voluntad de ejercitar sus neuronas, no existe ninguna razón por la que no pueda sentirse a gusto en este extraño nuevo mundo de la relatividad.

II. EL EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

¿Es relativo el movimiento? Si lo piensa por un momento se inclinará a contestar: ¡Claro que sí! Imaginemos un tren que se mueve hacia el norte a 100 kilómetros por hora. Dentro del tren un hombre camina hacia el sur a una velocidad de 4 kilómetros por hora. ¿En qué sentido se mueve y a qué velocidad? Vemos inmediatamente que no se puede responder a esta pregunta sin elegir un sistema de referencia. Con respecto al tren, el hombre se mueve hacia el sur a una velocidad de 4 kilómetros por hora. Con respecto a la tierra firme, se mueve hacia el norte a 100 − 4 = 96 kilómetros por hora.

¿Podemos decir que la velocidad del hombre relativa "a la tierra firme" es su verdadera velocidad absoluta? Es evidente que no, puesto que existen otros sistemas de referencia mayores. La misma Tierra se está moviendo. Gira y posee un movimiento pendular alrededor del Sol. El Sol, junto con todos sus planetas, se mueve a su vez a través de la Galaxia. La Galaxia gira y se mueve con relación a otras galaxias. Las galaxias forman cúmulos galácticos que se encuentran en movimiento relativo. Nadie sabe realmente hasta dónde llega esta cadena de movimientos. No existe aparentemente ningún medio de determinar el movimiento absoluto de ningún objeto, es decir, no existe un último sistema de referencia fijo

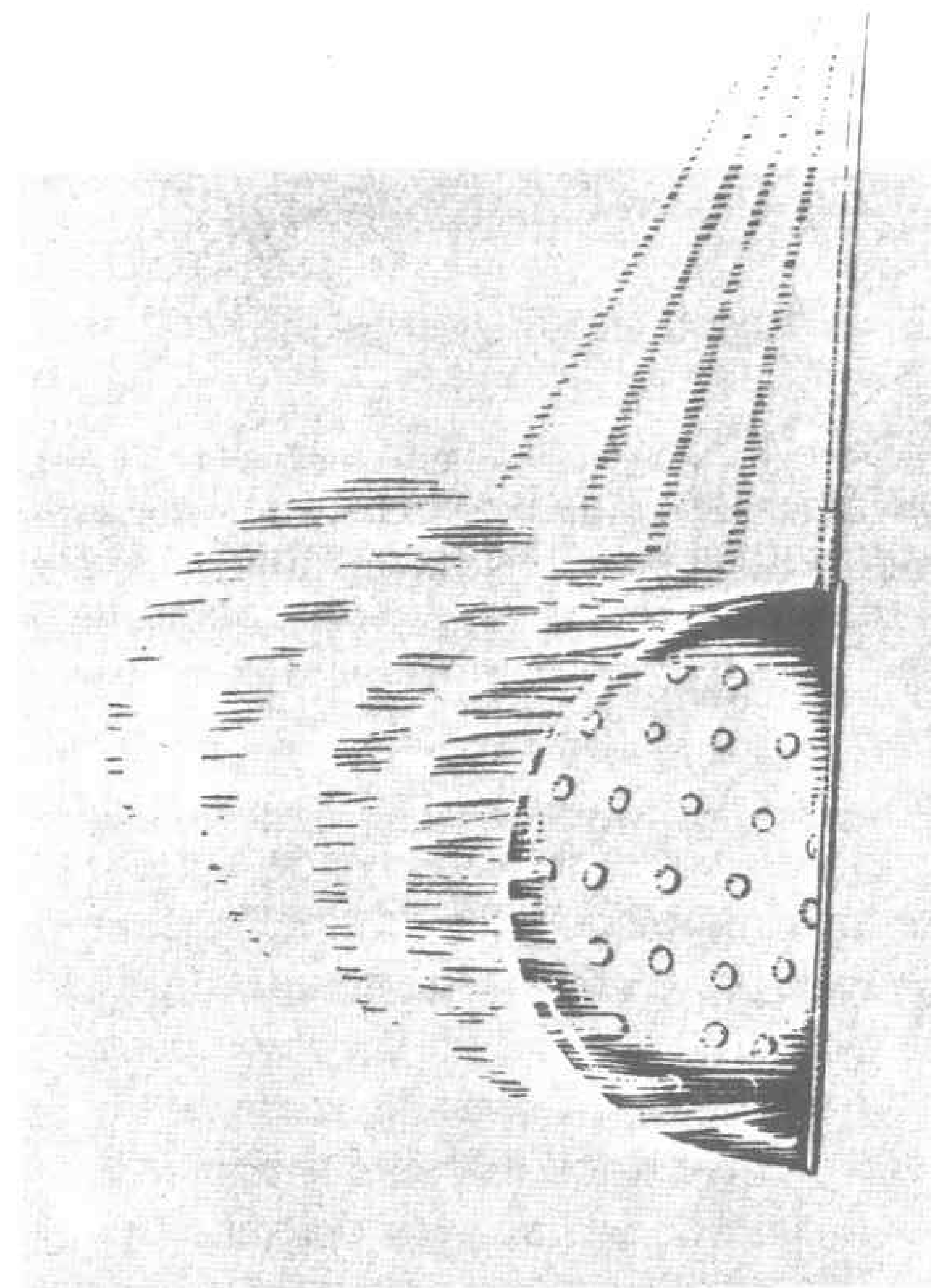
con respecto al cual podamos medir todos los movimientos*. Movimiento y reposo, como grande y pequeño, lento y rápido, izquierda y derecha, parecen ser conceptos completamente relativos. No hay manera de medir el movimiento de un objeto si no es comparándolo con el movimiento de otro.

Sin embargo, no todo es tan sencillo. Si esto fuera todo lo que se puede decir sobre la relatividad del movimiento, no hubiera sido necesario que Einstein desarrollara su teoría de la relatividad. ¡Los físicos ya sabían estas cosas!

La dificultad estriba en lo siguiente: en principio existen dos maneras muy sencillas de detectar el movimiento absoluto. El primer método se sirve de la velocidad de la luz; el segundo hace uso de varios efectos inerciales que tienen lugar cuando un objeto altera su trayectoria o velocidad. La teoría de la relatividad especial de Einstein está relacionada con el primer método, su teoría de la relatividad general con el segundo. En éste y en los dos capítulos siguientes estudiaremos el primer método posible para determinar el movimiento absoluto, es decir, el método que hace uso de la velocidad de la luz.

En el siglo XIX, antes de la época de Einstein, los físicos pensaban que el espacio absoluto, respecto al que referir en última instancia cualquier tipo de movimiento, estaba lleno de una especie de sustancia fija e invisible a la que llamaban *éter*. A menudo se le denominaba el "éter luminífero", para indicar que era el soporte o transmisor de las ondas lumínicas. Se extendía por todo el Universo y fluía libremente a través de todas las sustancias materiales. Si se extrajera todo el aire de una campana de vidrio, ésta continuaría llena de éter. Sin el éter, ¿cómo podría la luz propagarse en el vacío? La luz es un movimiento ondulatorio y las ondas precisan de un medio en

* Desde que esta frase fuera escrita se ha encontrado una nueva manera de medir el movimiento cuasi-absoluto de la Tierra relativo a la radiación de cuerpo negro que baña nuestro Universo. Esto se explicará en el último capítulo.



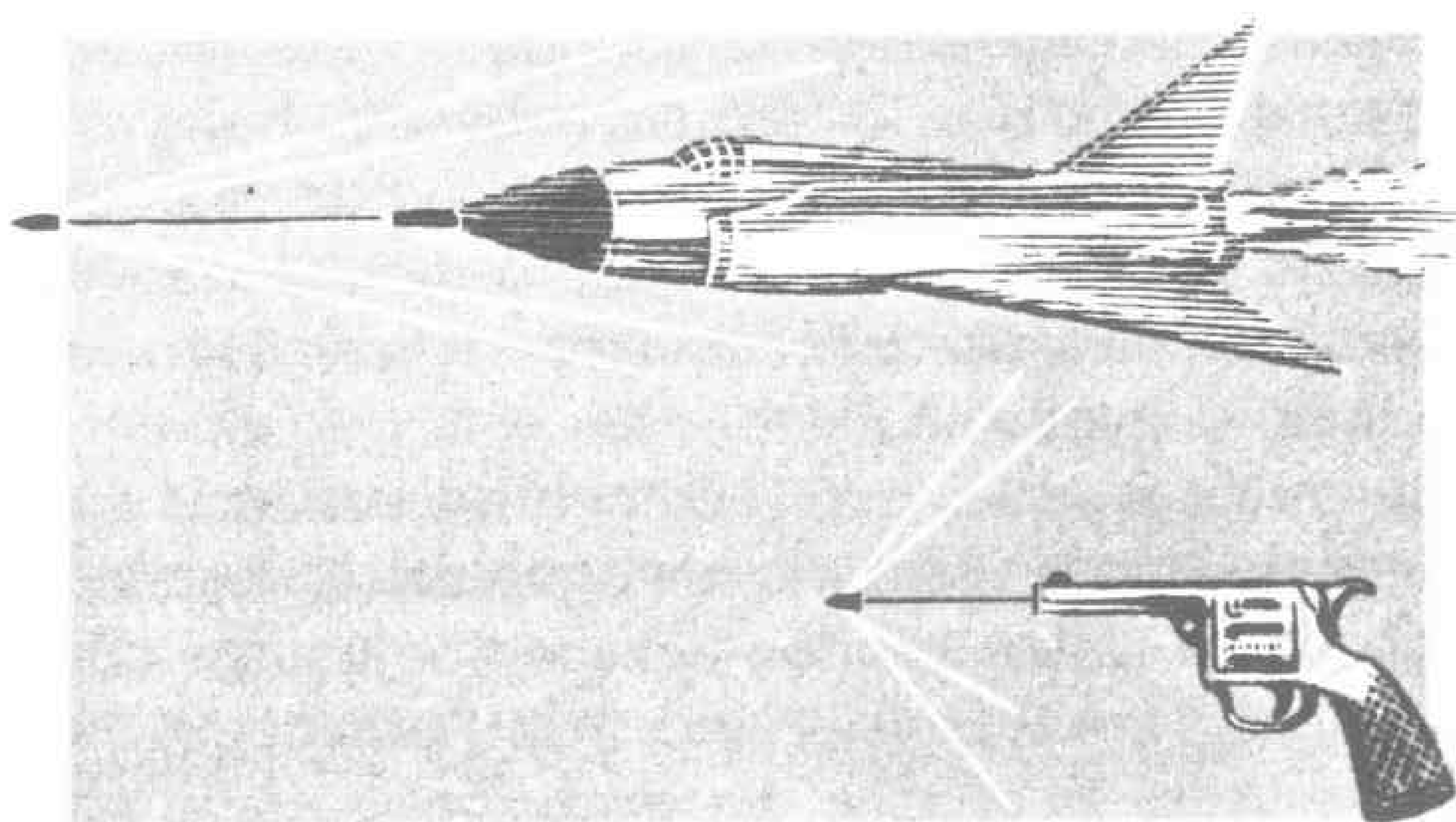
que propagarse. El éter debe ser capaz de vibrar, pero raramente (si es que llega a hacerlo) se mueve con respecto a los cuerpos materiales. Son los objetos los que se mueven libremente en su seno, tal como se mueve una hoz en el agua. El movimiento absoluto de una estrella, planeta, u otro objeto, sería simplemente su movimiento con respecto a este mar etéreo inmóvil e invisible.

Sin embargo, dado que el éter es una sustancia invisible e inmaterial —una sustancia que no puede ser percibida por ninguno de los cinco sentidos—, cabe preguntarse cómo es posible llegar a medir la velocidad de la Tierra con respecto a él. La respuesta es sencilla. La medición puede efectuarse

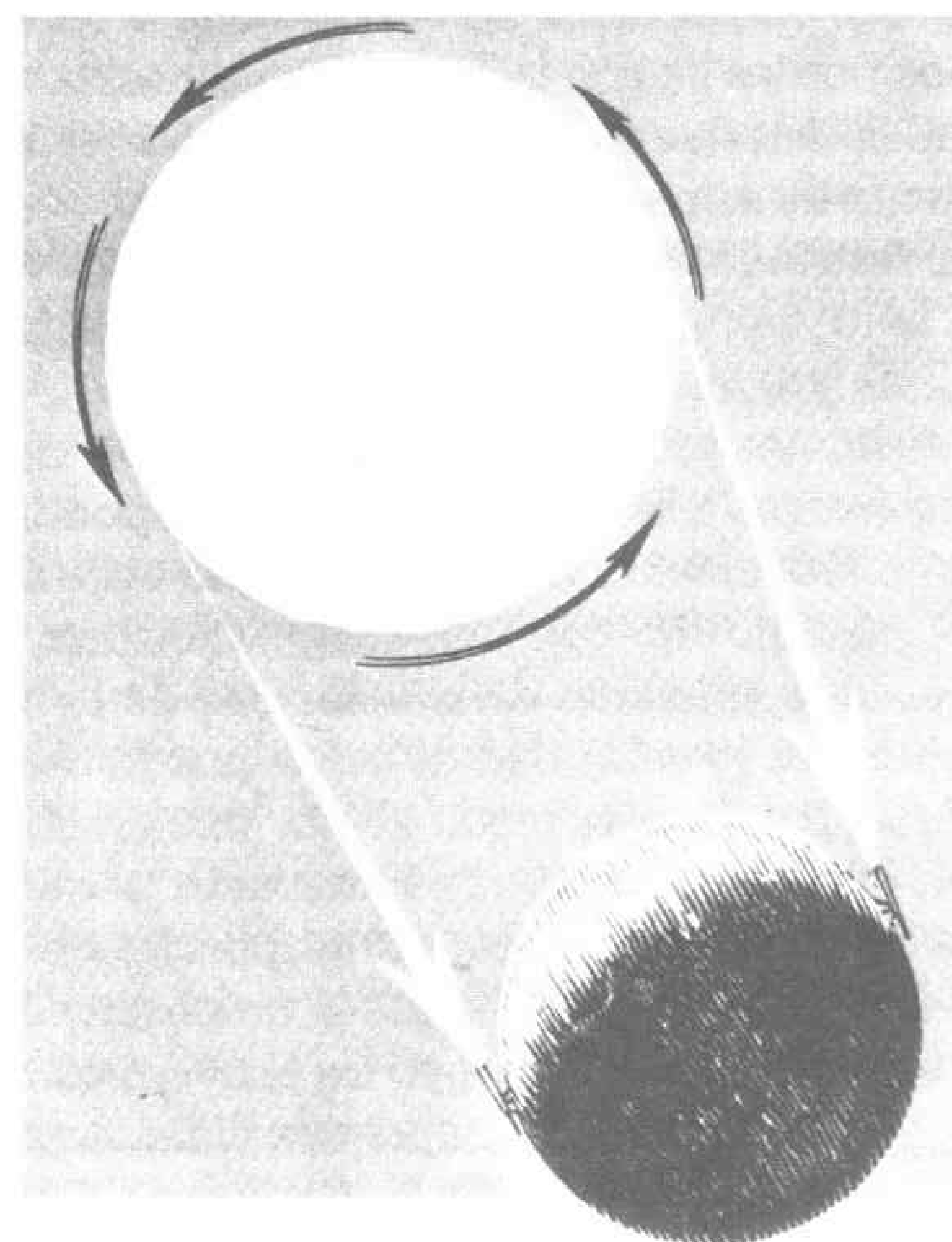


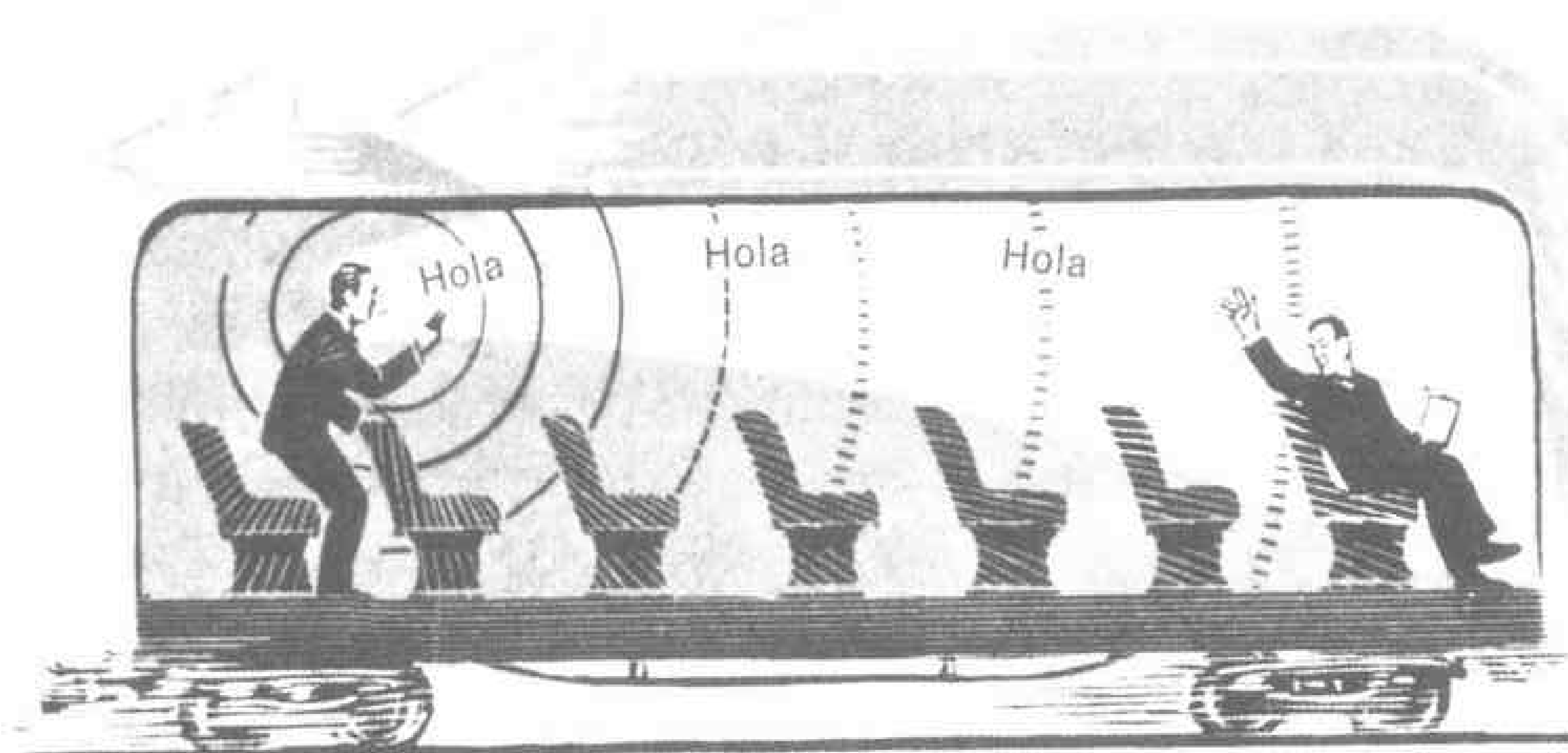
comparando el movimiento de la Tierra con el movimiento de señales luminosas.

Para entenderlo, reflexionemos un momento sobre la naturaleza de la luz. La luz es un movimiento ondulatorio. De hecho, la luz constituye solamente una pequeña porción del espectro de la radiación electromagnética que incluye las ondas de radio, las ondas de radar, la luz infrarroja, la luz ultravioleta y los rayos gamma. Todo lo que se diga sobre la luz en este libro es aplicable igualmente a cualquier otro tipo de onda electromagnética, pero dado que el término "luz" es más corto que el de "onda electromagnética" vamos a seguir usándolo en adelante. Pensar en un movimiento ondulatorio sin pensar a la vez en un soporte material (el éter) que lo transmita, les parecía a los físicos del siglo pasado algo tan absurdo como pensar en las olas del mar sin pensar en el agua.



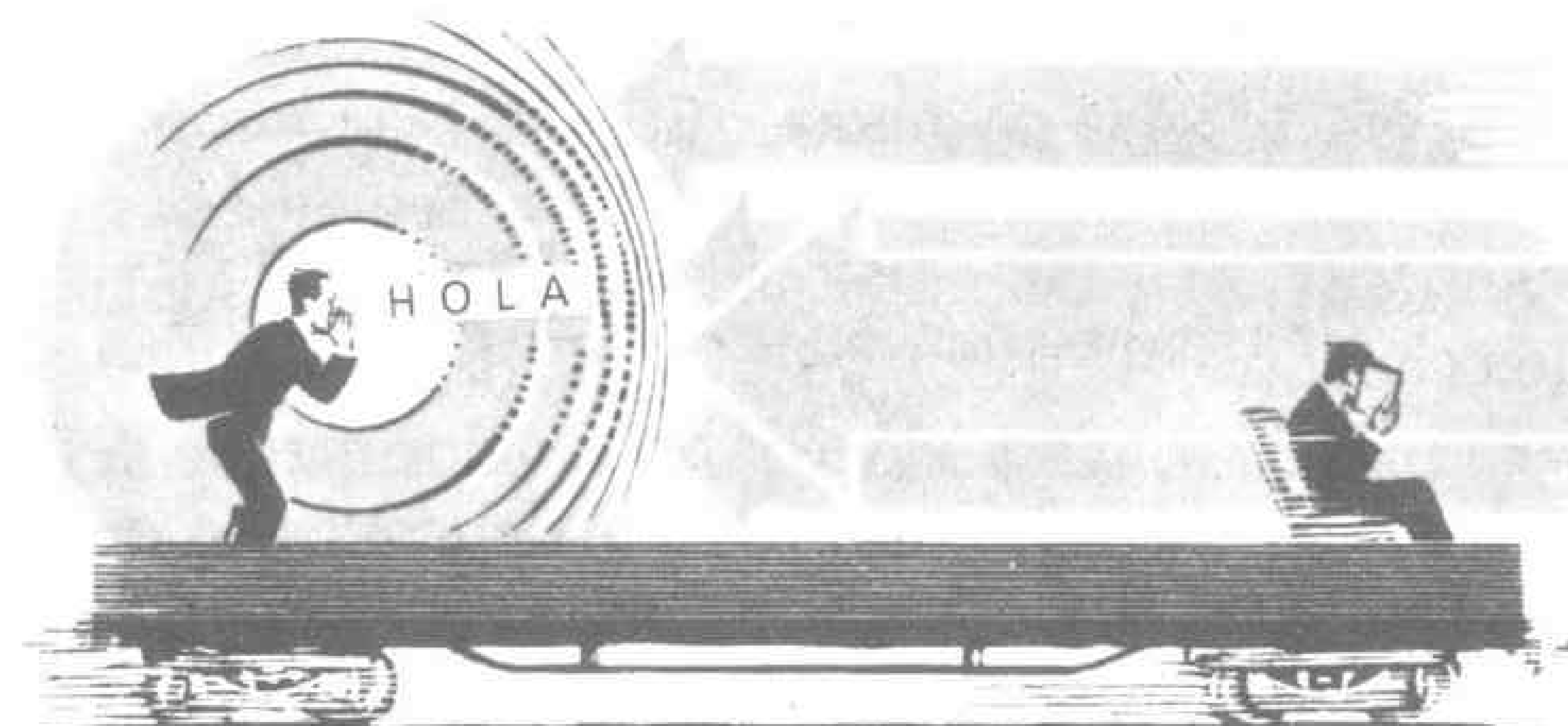
Si se dispara una bala desde la parte delantera de un avión de reacción en movimiento, la velocidad de la bala con respecto a la tierra firme será mayor que si se hubiera disparado desde el suelo. La velocidad relativa al suelo de la bala disparada desde el avión se obtiene sumando la velocidad del avión a la velocidad de la bala. Sin embargo, en el caso de la luz, la velocidad de un rayo luminoso no se ve afectada por la velocidad del objeto que lo emite. Esto lo indicaban muchos experimentos llevados a cabo al final del siglo XIX y principios del XX, y ha sido ampliamente confirmado desde entonces, especialmente gracias a recientes investigaciones sobre la desintegración de los mesones pi neutros. En 1955 se hizo una famosa verificación a cargo de astrónomos rusos, que usaron luz procedente de lados opuestos del disco solar.





Uno de los bordes del Sol se mueve siempre hacia nosotros, mientras que el otro se aleja. Se observó que la luz procedente de ambos bordes llega a la Tierra con la misma velocidad. Unas décadas antes se habían hecho pruebas similares con luz procedente de estrellas dobles que giran una con respecto a la otra. El resultado era el mismo, es decir, a pesar del movimiento de la fuente, la velocidad de la luz es siempre la misma: unos 299.800 kilómetros por segundo.

Este hecho nos proporciona un método mediante el cual un científico (vamos a llamarlo el observador) podría determinar su propio movimiento absoluto. Si la luz viaja a través de un éter estacionario fijo con una cierta velocidad, *c*, y si su velocidad es independiente de la velocidad de la fuente que la emite, entonces la velocidad de la luz puede usarse como una especie de patrón para medir el movimiento absoluto del observador. Un observador que se mueva en el mismo sentido que un rayo de luz deberá ver cómo el rayo de luz lo adelanta a una velocidad menor que *c*; un observador que se mueva en sentido contrario al rayo de luz verá cómo éste se aproxima a él a una velocidad mayor que *c*. En otras palabras, los resultados de las medidas de la velocidad de un rayo de



luz deberán variar según el movimiento del observador con respecto al rayo. Estas variaciones determinarán su verdadero movimiento absoluto a través del éter.

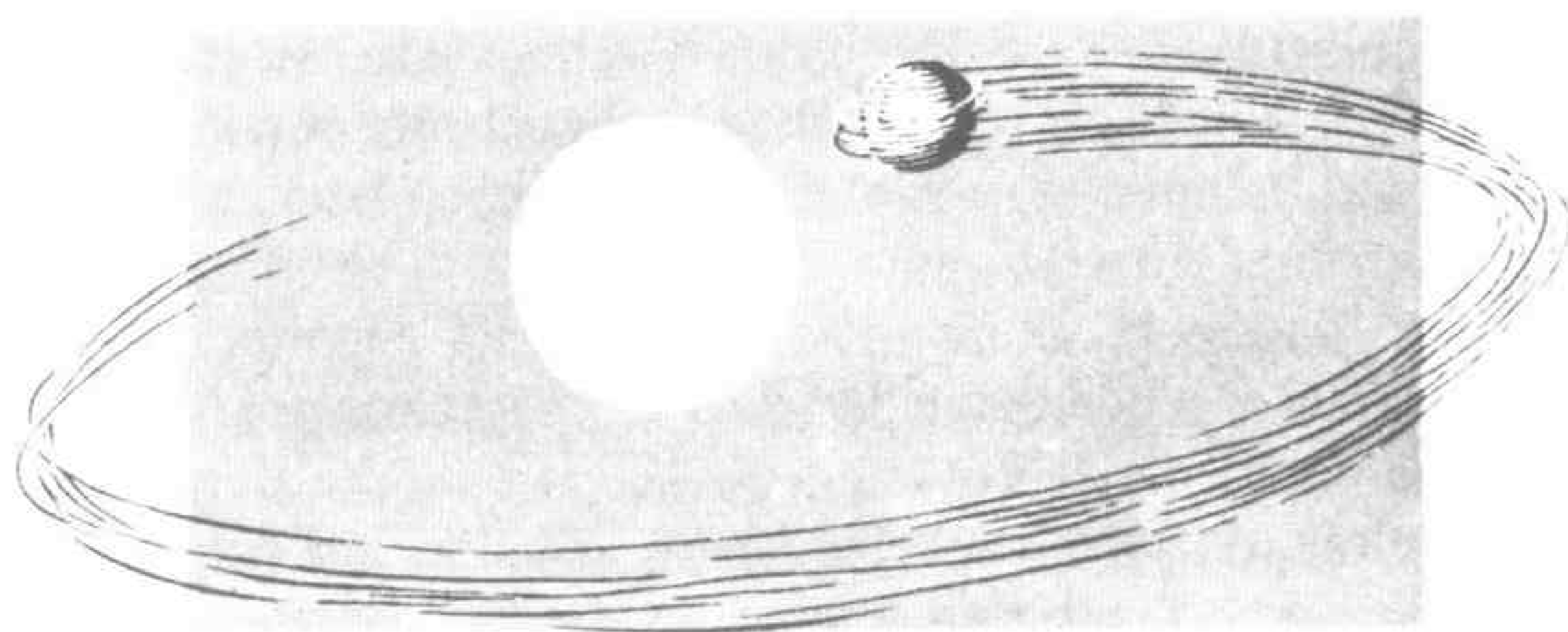
Los físicos describen esta situación en términos de lo que llaman el "viento de éter". Para entender lo que quieren decir con esto, consideremos otra vez el movimiento del tren. Hemos visto que la velocidad de un hombre que camina en el interior del tren a 4 kilómetros por hora es siempre la misma relativa al tren, sin que importe que se mueva hacia la máquina o hacia el furgón de cola. Lo mismo vale para la velocidad de las ondas sonoras en el interior de un vagón cerrado. El sonido es un movimiento ondulatorio que se transmite gracias a las moléculas de aire. Dado que el aire es a su vez transportado por el vagón, el sonido viaja hacia el norte con la misma velocidad (relativa al vagón) con que lo hace hacia el sur.

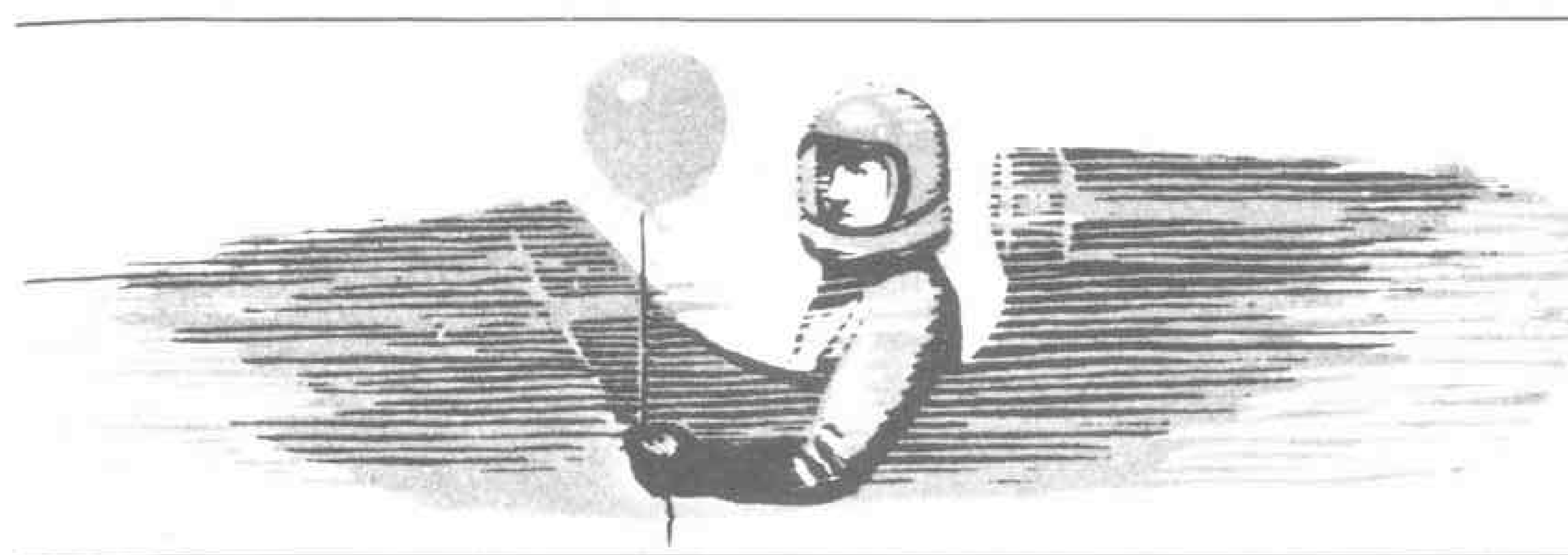
La situación es distinta si cambiamos el vagón cerrado por una vagoneta. El aire ahora ya no está encerrado. Si el tren se mueve a una velocidad de 100 kilómetros por hora, en la vagoneta soplará un viento de 100 kilómetros por hora y hacia atrás. A causa de este viento, la velocidad del sonido desde la parte de atrás de la vagoneta hacia la parte delantera

será menor que la normal. En cambio, la velocidad del sonido desde la parte frontal a la trasera será mayor que la normal.

Los físicos del siglo XIX creían que el éter debía comportarse como el aire de la vagoneta. ¿Cómo podría ser de otro modo? Si el éter está en reposo, cualquier objeto que se mueva a través de él debe encontrar un "viento de éter" soplando en la dirección opuesta. La luz es un movimiento ondulatorio en este éter fijo; por tanto, el valor de la velocidad de la luz, medido desde un objeto en movimiento, deberá verse afectado por el viento de éter.

La Tierra se mueve vertiginosamente a través del espacio en su órbita alrededor del Sol, a una velocidad de aproximadamente 30 kilómetros por segundo. Según los físicos de finales del siglo pasado, este movimiento debería crear un viento de éter de 30 kilómetros por segundo, soplando en oposición al avance de la Tierra y pasando libremente por entre todos sus átomos. Para medir el movimiento absoluto de la Tierra (su movimiento respecto al éter fijo) sería suficiente con medir la velocidad de un rayo de luz sobre la superficie de la Tierra en distintas direcciones. Debido al viento de éter, la luz debería moverse más rápidamente en una dirección determinada. Comparando las distintas velocidades de la luz en distintas direcciones debería ser posible calcular la velocidad y dirección absolutas del movimiento de la Tierra en cual-





quier instante dado. Tal experimento fue propuesto por primera vez en 1875, cuatro años antes del nacimiento de Einstein, por el gran físico escocés James Clerk Maxwell*.

En 1881, Albert Abraham Michelson, por aquel entonces un joven oficial de la marina de los Estados Unidos, llevó a cabo el experimento. Michelson, hijo de padres polacos, había nacido en Alemania, pero sus padres emigraron a los Estados Unidos cuando él contaba solamente dos años de edad. Después de graduarse en la Academia Naval de los Estados Unidos, en Annapolis, y de servir dos años en el mar, pasó a ser profesor de física y química en la Academia. Obtuvo un permiso para estudiar en la Universidad de Berlín, en el laboratorio del famoso físico alemán Hermann von Helmholtz, donde el joven Michelson llevó a cabo su primer intento de detectar el viento de éter y con ello medir la velocidad absoluta de la Tierra. Con gran sorpresa por su parte, no pudo encontrar ninguna diferencia en la velocidad con que la luz se propaga en distintas direcciones. Fue como si un pez hubiera descubierto que podía nadar dentro del mar en cualquier dirección sin ser capaz de detectar el movimiento del agua a lo largo de su cuerpo; como si el piloto de un avión volando en la carlinga descubierta no pudiera sentir el aire contra su cara.

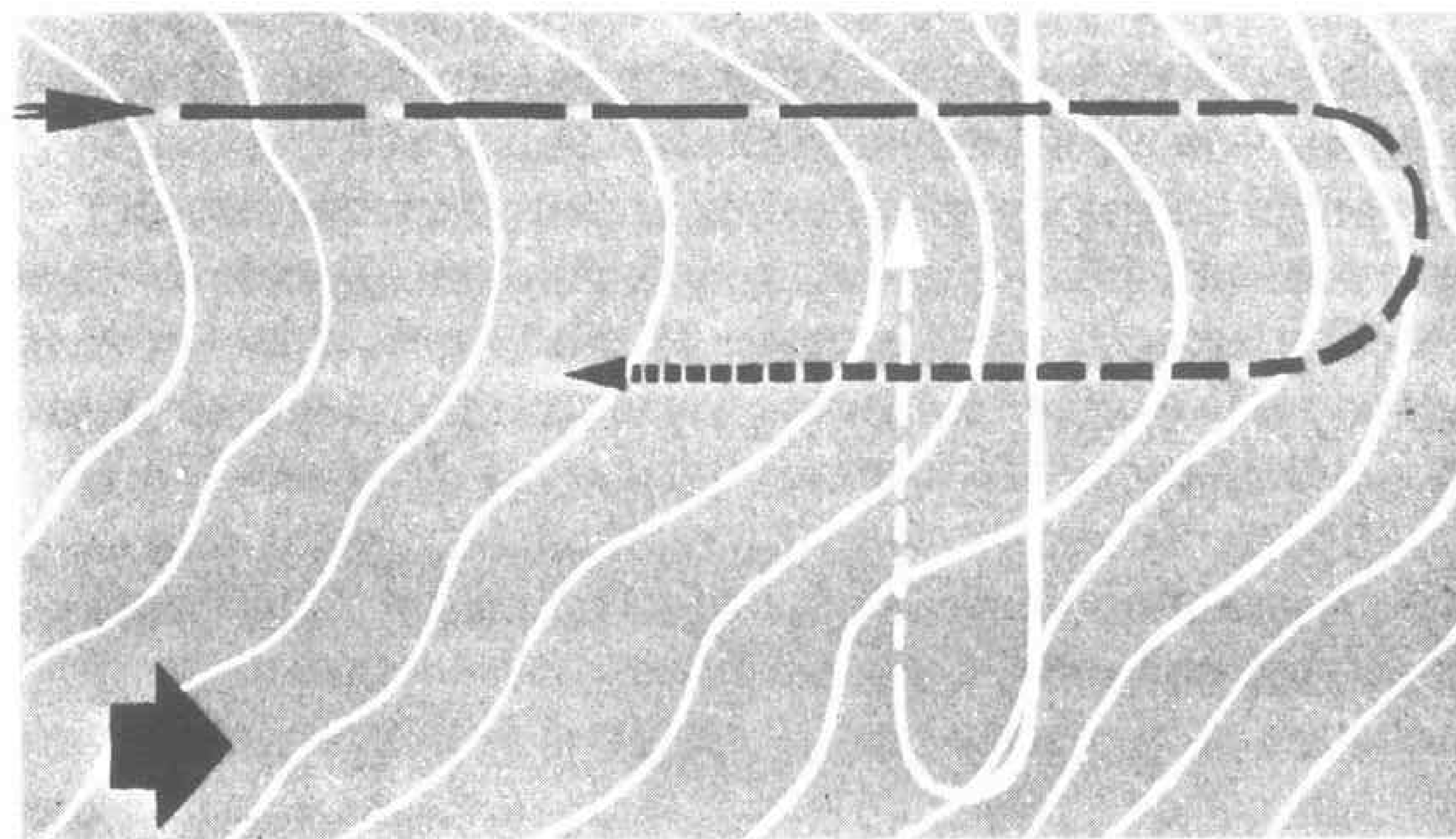
* La sugerencia aparece en el artículo de Maxwell sobre el éter en la novena edición de la *Encyclopaedia Britannica*.

Un distinguido físico austriaco llamado Ernst Mach (volveremos a hablar de él en el capítulo 8) había criticado varias veces la noción de movimiento absoluto a través del éter. Leyó el artículo de Michelson sobre su experimento y concluyó que había que abandonar el concepto del éter. Sin embargo, la mayor parte de los físicos no osaban dar este paso tan atrevido. El dispositivo experimental usado por Michelson había sido rudimentario. Existían buenas razones para creer que un experimento mejor diseñado, con equipo más sensible, daría resultados positivos. El propio Michelson lo pensaba. Se sintió desilusionado por el "fracaso" de su experimento y ardía en deseos de intentarlo de nuevo.

Michelson dejó la marina para convertirse en profesor de física en la Case School of Applied Science, en Cleveland, Ohio. No muy lejos de allí, en la Western Reserve University, Edward Williams Morley enseñaba química. Pronto los dos hombres se hicieron buenos amigos. «Externamente», escribe Bernard Jaffe en su libro *Michelson and the Speed of Light,* «los dos hombres eran un caso digno de estudio por su contraste... Michelson era bien parecido y aseado, siempre impecablemente vestido. Morley, descuidado en su vestimenta, por decirlo suavemente, era el estereotipo del profesor distraído... Dejaba que el cabello le creciera hasta los hombros y llevaba un descomunal bigote rojo que le llegaba hasta las orejas.»

En 1887, en el sótano del laboratorio de Michelson, los dos científicos llevaron a cabo un segundo intento, mucho más meticuloso, de detectar el escurridizo viento de éter. Su experimento, que pasó a ser conocido como el experimento de Michelson-Morley, marcó uno de los grandes hitos de la física moderna.

El aparato se montó sobre un bloque cuadrado de piedra de aproximadamente un metro y medio de lado y más de treinta centímetros de grosor. El bloque flotaba en un baño



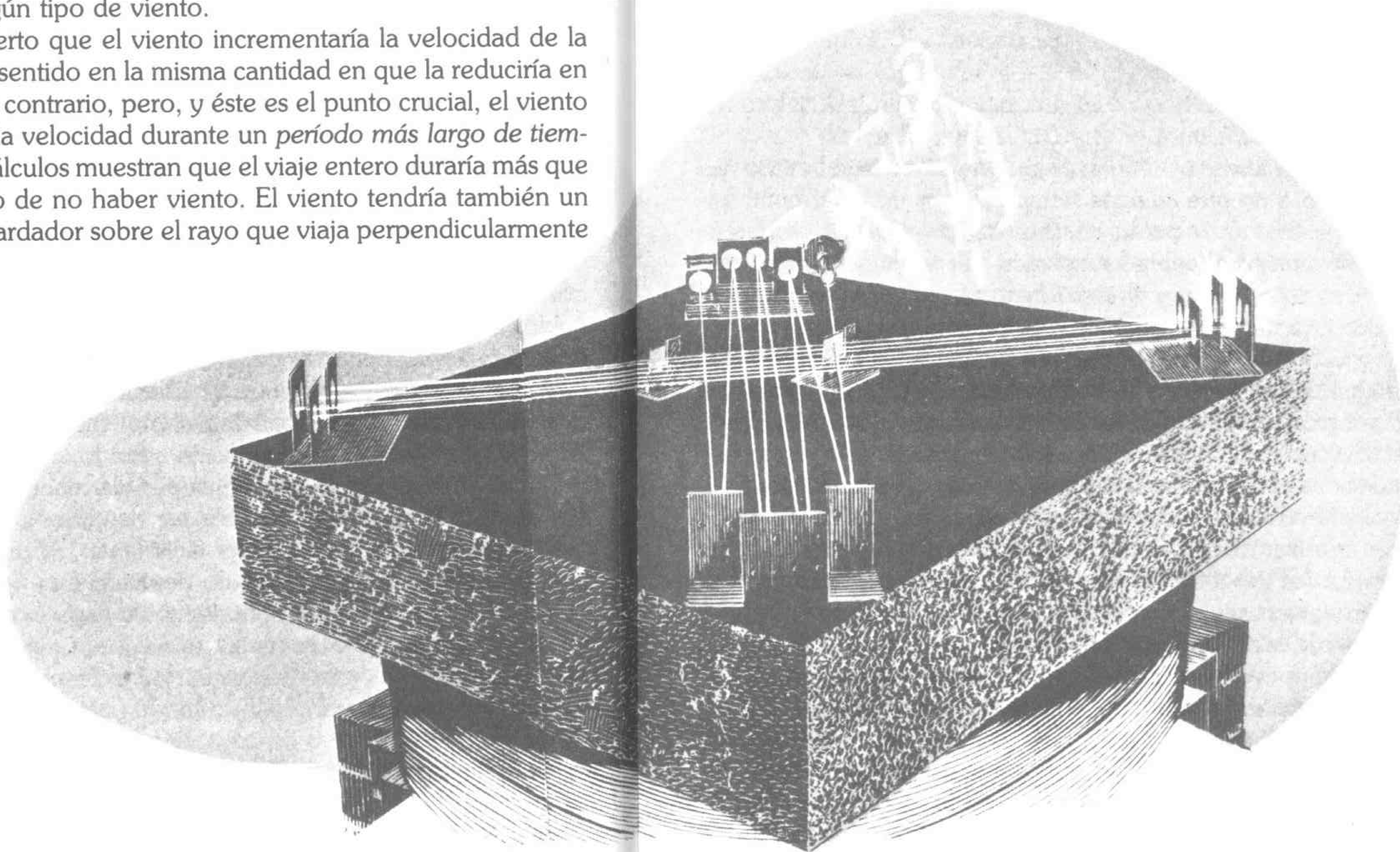
de mercurio líquido a fin de eliminar vibraciones, mantener el bloque en posición horizontal y permitir que pudiera girar fácilmente alrededor de un eje central. Unos espejos semiplateados dispuestos sobre la losa de piedra desdoblaban un haz de luz en dos direcciones perpendiculares entre sí. Entonces una serie de espejos dispuestos adecuadamente reflejaban una y otra vez el rayo de luz, hasta completar un total de ocho viajes de ida y vuelta (esto se hacía a fin de que el recorrido del rayo de luz fuera lo más largo posible manteniendo a la vez al equipo en un dispositivo no demasiado grande de modo que pudiera hacerse girar fácilmente). Al mismo tiempo, el rayo de luz que había sido desviado en una dirección perpendicular a la original sufría también hasta ocho reflexiones, producidas por un segundo conjunto de espejos colocados en una dirección perpendicular a los primeros.

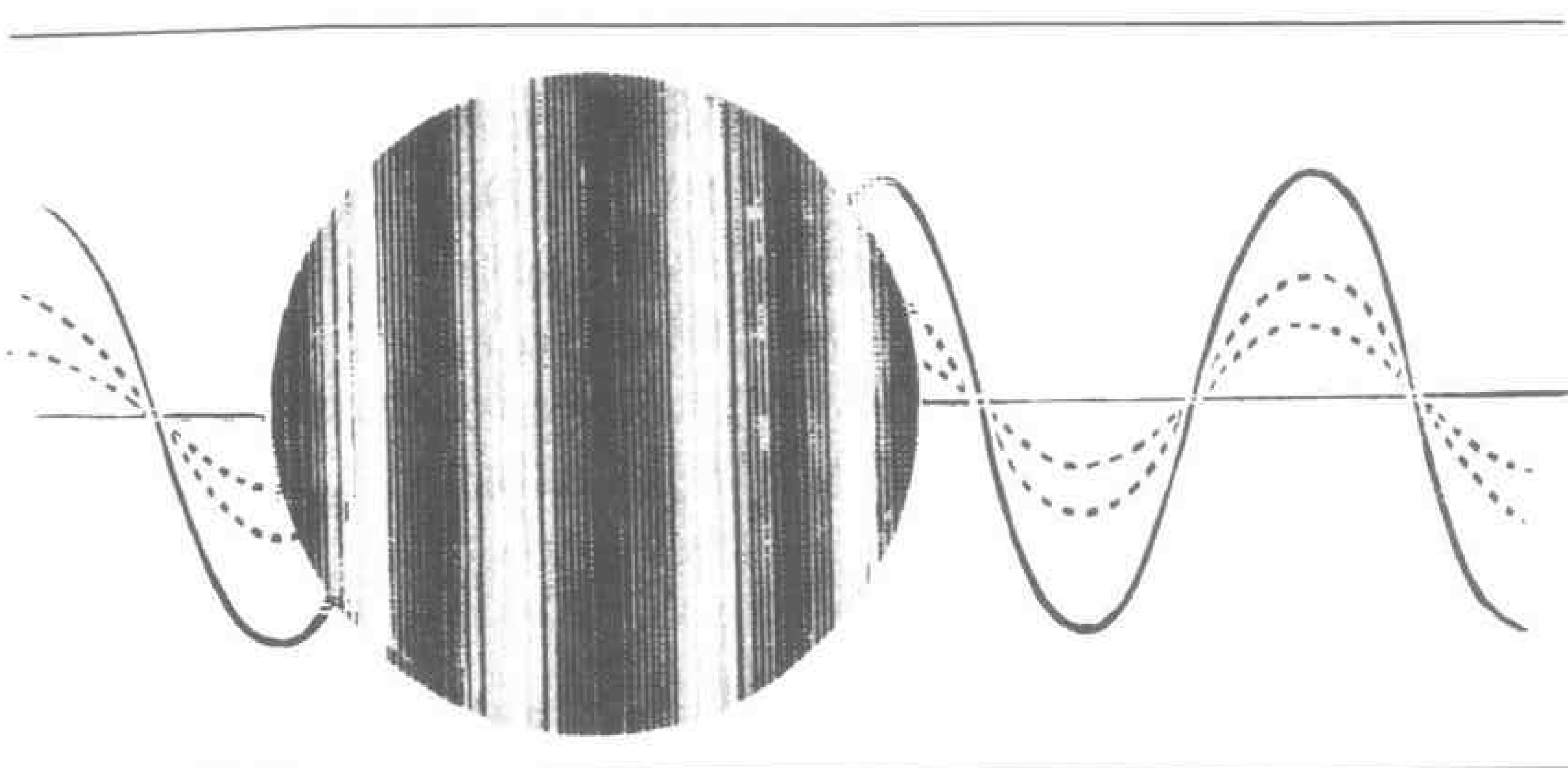
Se esperaba que cuando el bloque estuviera orientado de tal forma que un rayo de luz viajara *paralelamente* al viento de éter, este rayo completaría el viaje en un tiempo más largo que el que le llevaría al otro rayo recorrer la misma distancia en una dirección perpendicular al viento de éter. En

principio, cabe pensar que lo que debería ocurrir es lo contrario. Considérese la luz que viaja a favor y en contra del viento. ¿No incrementará el viento la velocidad de la luz en un sentido en la misma magnitud en que la reducirá en el sentido contrario? Si es así, el aumento y la disminución de velocidad se compensarán exactamente, de modo que el tiempo empleado en el recorrido completo será el mismo que si no hubiera ningún tipo de viento.

Es cierto que el viento incrementaría la velocidad de la luz en un sentido en la misma cantidad en que la reduciría en el sentido contrario, pero, y éste es el punto crucial, el viento reduciría la velocidad durante un *período más largo de tiempo*. Los cálculos muestran que el viaje entero duraría más que en el caso de no haber viento. El viento tendría también un efecto retardador sobre el rayo que viaja perpendicularmente a la dirección del viento. Esto también puede calcularse con facilidad. Pero en este caso el efecto retardador es menor que en el caso del rayo que viaja paralelamente al viento.

Existían pocas dudas, por tanto, de que *si* la Tierra se movía a través de un mar de éter inmóvil, debería haber un viento de éter, y que si este viento existía, el aparato de Michelson-Morley debería ser capaz de detectarlo. De hecho,





los dos científicos confiaban en que no solamente detectarían el viento, sino que además serían capaces de determinar (girando el bloque de piedra hasta que se produjera una diferencia máxima en el tiempo empleado por la luz para completar los dos recorridos) la dirección exacta, en cualquier instante de la trayectoria de la Tierra a través del éter.

Vale la pena señalar que el aparato de Michelson-Morley no medía las velocidades concretas de cada rayo de luz. Los dos rayos, después de recorrer sus respectivos viajes de ida y vuelta, se combinaban en un único rayo que se observaba a través de un pequeño telescopio. Entonces se hacía girar lentamente el dispositivo. Cualquier alteración en las velocidades relativas de los dos rayos produciría un corrimiento de las franjas del espectro de interferencia, es decir, de las bandas alternativamente claras y oscuras producidas por la interferencia de las dos ondas luminosas.

De nuevo Michelson se mostró asombrado y desilusionado. Esta vez el asombro fue compartido por los físicos de todo el mundo. Con independencia de la dirección en que Michelson y Morley hicieran girar su aparato, no encontraron el menor indicio de un viento de éter. Nunca antes en la historia de la ciencia el resultado negativo de un experimento fue tan

positivo y tan demoledor. Michelson, una vez más, pensó que su experimento había sido un fracaso. Nunca pudo imaginar que este "fracaso" haría de su experimento uno de los más célebres y revolucionarios de la historia de la ciencia.

Más tarde, Michelson y Morley repitieron su experimento con un equipo todavía más perfeccionado. Otros físicos hicieron lo propio. Un experimento de extrema precisión fue llevado a cabo en 1960 por Charles H. Townes en la Universidad Columbia. Su aparato, que usaba un dispositivo denominado máser (un "reloj atómico" basado en la vibración de las moléculas), era tan sensible que podría haber detectado un viento de éter incluso si la Tierra se moviera a una milésima parte de su verdadera velocidad. No se encontró ni rastro de dicho viento.

Los físicos, al principio, estaban tan asombrados ante los resultados negativos del experimento de Michelson-Morley que empezaron a inventar todo tipo de explicaciones para no tener que abandonar la teoría del viento de éter. Sin duda, si el experimento se hubiera llevado a cabo un par de siglos atrás, como señala G. J. Whitrow en su libro *The Structure and Evolution of the Universe,* cualquiera hubiera encontrado inmediatamente una explicación muy sencilla: la Tierra no se mueve. Pero en el siglo XIX la mejor explicación era una teoría (muy anterior al primer experimento de Michelson-Morley) según la cual el éter era arrastrado por la Tierra del mismo modo que el aire en el interior de un vagón cerrado de tren. Ésta era la propia hipótesis de Michelson. Sin embargo, otros experimentos, incluso uno del propio Michelson, hicieron descartar esta idea.

La explicación más extraña fue propuesta por un físico irlandés, George Francis FitzGerald. Quizá, dijo, el viento de éter ejerce una presión sobre los objetos en movimiento, haciendo que se contraigan un poco en la dirección en que se mueven. Según FitzGerald, para determinar la longitud de un

objeto en movimiento, su longitud en reposo debería multiplicarse por el siguiente factor, donde v^2 es el cuadrado de la velocidad del objeto y c^2 el cuadrado de la velocidad de la luz:

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}.$$

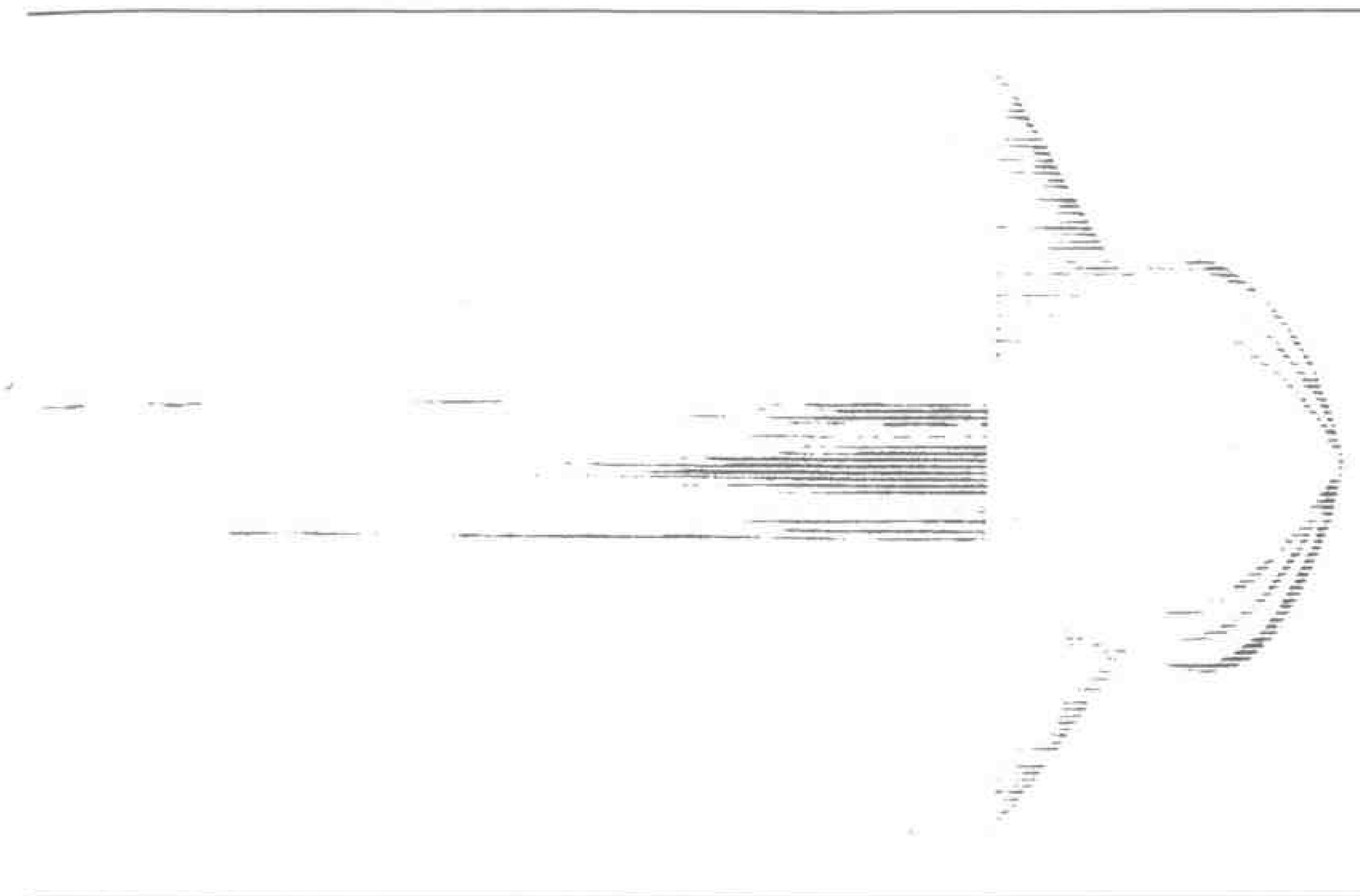
Si se analiza este factor, se verá que la magnitud de la contracción es despreciable a pequeñas velocidades, aumenta a medida que lo hace la velocidad y se hace muy importante cuando la velocidad del objeto se aproxima a la velocidad de la luz. Así, una nave espacial en forma de cigarro largo, si se moviera a gran velocidad, pasaría a tener forma de cigarro corto. La velocidad de la luz es un límite inasequible. Si se llegara a alcanzar, el factor anterior se reduciría a:

$$\sqrt{1-\frac{c^2}{c^2}},$$

es decir, a cero. Si multiplicamos la longitud del objeto por cero obtenemos cero. En otras palabras, si un objeto pudiera alcanzar la velocidad de la luz, carecería de longitud en la dirección de su movimiento.

La teoría de FitzGerald fue expresada en forma matemática elegante por el físico holandés Hendrik Antoon Lorentz, que había llegado independientemente a la misma explicación (Lorentz llegó a ser uno de los mejores amigos de Einstein, pero en aquel momento todavía no se conocían). La teoría se conoce como la teoría de la contracción de Lorentz-FitzGerald (o de FitzGerald-Lorentz).

Es fácil ver cómo la teoría de la contracción podía explicar el fracaso del experimento de Michelson-Morley. Si el bloque de piedra y todos los aparatos dispuestos encima del mismo se contrajeran en una diminuta magnitud en la dirección del viento de éter, la luz tendría que recorrer una distancia



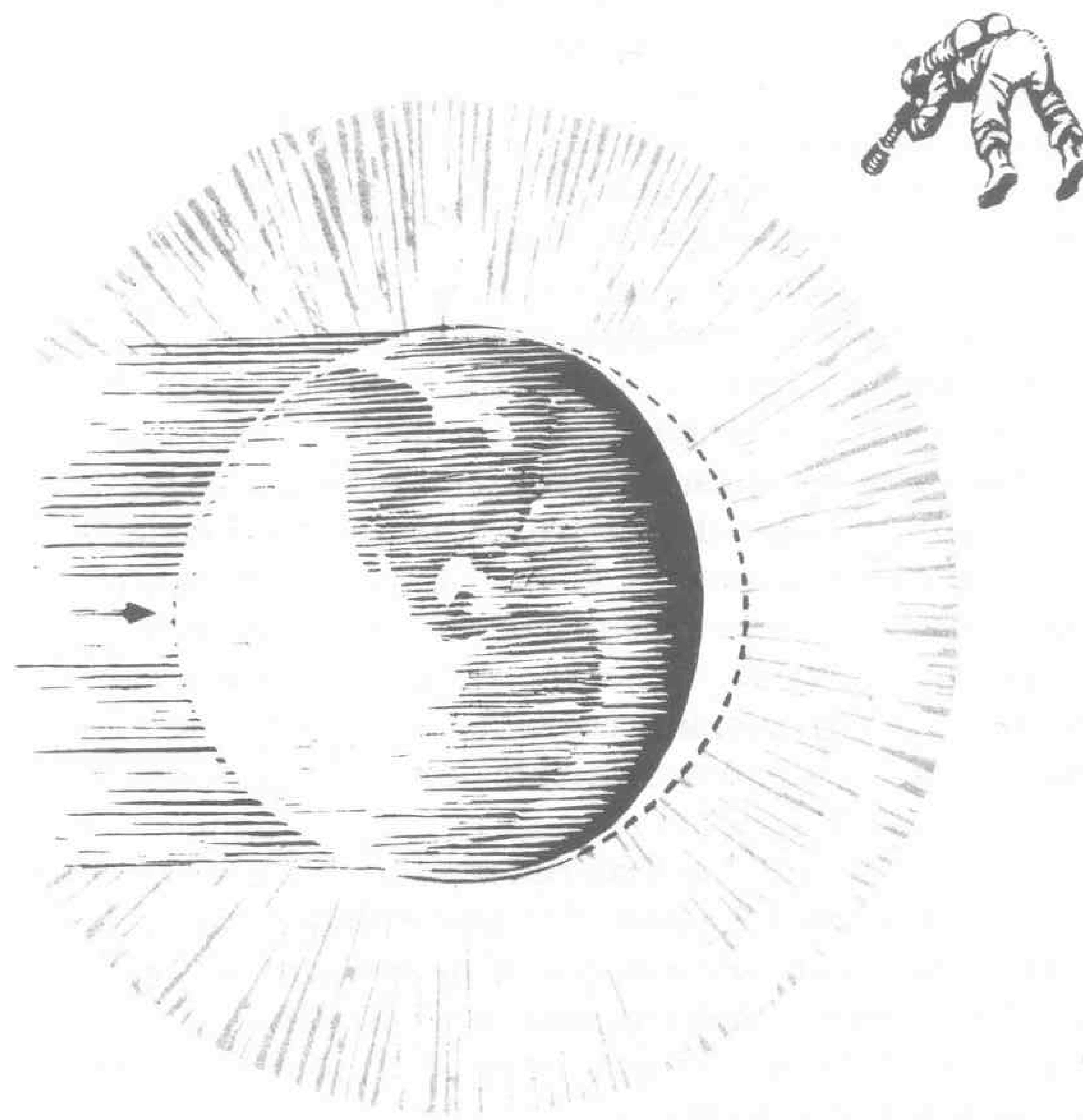
total menor. Aun en el caso de que el viento ejerciera alguna influencia sobre la trayectoria de ida y vuelta del rayo de luz, el recorrido más corto permitiría al rayo completarlo en el mismo tiempo que hubiera tardado de no haber existido viento y tampoco contracción. Dicho de otra manera, la contracción sería justamente la necesaria para mantener constante la velocidad de la luz, prescindiendo de la dirección en que se hubiera orientado el aparato de Michelson-Morley.

¿Por qué, cabría preguntarse, no se puede comprobar esta teoría midiendo la longitud del aparato para ver si realmente se ha contraído en la dirección del movimiento de la Tierra? La respuesta es que la regla graduada también se habrá contraído en la misma proporción. En consecuencia, se obtendrán las mismas medidas tanto si ha habido como si no ha habido contracción. La contracción es aplicable a *todas las cosas* situadas sobre la Tierra en movimiento. La situación es análoga al experimento ideal de Poincaré (ver capítulo 1), en el cual el Cosmos aumenta de repente mil veces de tamaño;

la diferencia es que en el caso de la teoría de Lorentz-FitzGerald el cambio sólo tiene lugar en la dirección del movimiento. Dado que el cambio se aplica a todas las cosas, no hay manera de detectarlo. Dentro de ciertos límites (los límites son establecidos por una rama de las matemáticas llamada topología, o estudio de las propiedades que permanecen invariables cuando un objeto se deforma), la forma en sí misma es tan relativa como el tamaño. La contracción del aparato, del mismo modo que la contracción de cualquier otra cosa en la Tierra, sólo podría ser observada por alguien fuera de la Tierra que no estuviera moviéndose con ella.

Muchos de los autores que han escrito sobre relatividad han calificado a la contracción de Lorentz-FitzGerald de hipótesis *ad hoc,* es decir formulada "únicamente para este caso", e incapaz de ser contrastada por ningún tipo de experimento. Esto no es estrictamente cierto, como ha señalado Adolf Grünbaum. La teoría de la contracción era *ad hoc* sólo en el sentido de que en aquel tiempo no había manera de contrastarla. En principio no es *ad hoc* en absoluto. De hecho, fue refutada definitivamente en 1932 por un importante experimento, el llamado experimento de Kennedy-Thorndike.

Roy J. Kennedy y Edward M. Thorndike, dos físicos estadounidenses, repitieron el experimento de Michelson-Morley con una diferencia notable: en lugar de hacer los dos brazos del aparato lo más iguales posible en longitud, los hicieron de longitud tan distinta como les fue posible. En el experimento se hacía girar el aparato para ver si se producía algún cambio en la diferencia entre los tiempos que tardaban los dos rayos de luz en completar los viajes de ida y vuelta en las dos direcciones. De acuerdo con la teoría de la contracción, esta diferencia de tiempos debería modificarse al girar el aparato. Se detectaría (como en el experimento de Michelson) por los cambios en las franjas de interferencia cuando los dos rayos se superpusieran. Tales cambios no se observaron. En años



recientes se han llevado a cabo experimentos más minuciosos empleando una fuente de luz Mössbauer (el efecto Mössbauer será tratado en el capítulo 9) y un receptor montado en los extremos opuestos de un giradiscos muy veloz. Todos estos experimentos han dado resultados negativos*.

Aunque experimentos de esta clase no podían hacerse

* En un experimento llevado a cabo en 1970 empleando el efecto Mössbauer habría sido posible detectar una velocidad absoluta de la Tierra de tan sólo 5 om/s. *(N. del T.)*

en los tiempos de Lorentz, éste se dio cuenta de que en principio podían llevarse a cabo, y de que existían buenas razones para creer que, al igual que en el experimento de Michelson, darían resultados negativos. Esperando estos probables resultados, Lorentz hizo un añadido importante a su teoría original. Introdujo cambios en el tiempo. Los relojes, dijo, se atrasan por la acción del viento de éter, de tal forma que toda medición de la velocidad de la luz da siempre 299.800 kilómetros por segundo.

Para dar un ejemplo de cómo funcionan estos cambios, supóngase que intentamos medir la velocidad de la luz desde A hasta B a lo largo de una trayectoria rectilínea en la dirección del movimiento de la Tierra. Se sincronizan dos relojes en A, y luego uno de ellos se traslada a B. Se anota la hora a la que un rayo de luz sale de A y la hora (medida por el otro reloj) a la que el rayo de luz se recibe en B. Dado que la luz se habrá movido *en contra* del viento de éter, su velocidad habrá disminuido y la duración del viaje será un poco mayor que si la Tierra hubiera permanecido en reposo. ¿Descubren el error en este argumento? El reloj, al moverse desde A hasta B, también se mueve en contra del viento de éter. De ahí que el reloj en B esté ligeramente *retrasado* respecto del reloj en A. El resultado es: la velocidad de la luz sigue siendo de 299.800 kilómetros por segundo.

Exactamente igual ocurre (según Lorentz) si la velocidad de la luz se mide en la dirección opuesta, desde B hasta A. Los dos relojes se sincronizan en B y entonces uno de ellos es transportado hasta A. Un rayo de luz se envía desde B hasta A, moviéndose *a favor* del viento de éter. La velocidad del rayo de luz es mayor debido al viento, por tanto el tiempo que tarda el rayo de luz en recorrer la distancia entre B y A deberá ser un poco menor que si la Tierra estuviera en reposo. Sin embargo, al mover el reloj desde B hasta A, éste viajó también a favor del viento. La reducción de la presión del

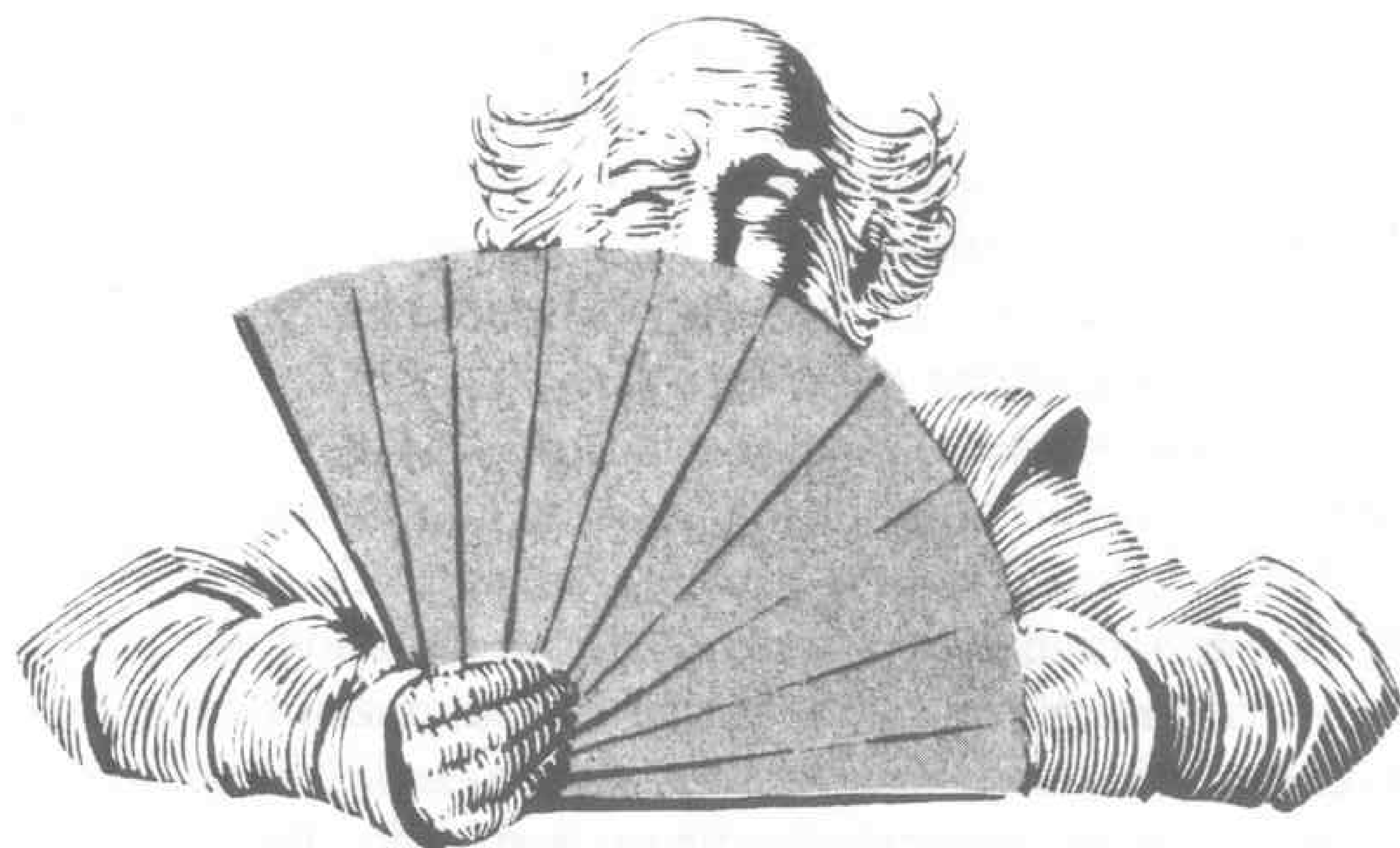
viento de éter sobre el reloj en movimiento le permitió ir más deprisa; por tanto, cuando se realiza el experimento, el reloj en A está ligeramente *adelantado* con respecto al reloj en B. La velocidad de la luz, una vez más, sigue siendo de 299.800 kilómetros por segundo.

La nueva teoría de Lorentz no solamente da cuenta de los resultados negativos del experimento de Michelson-Morley, sino que explica también el resultado negativo de cualquier experimento destinado a detectar cambios en la velocidad de la luz como resultado de la existencia de un viento de éter. Sus ecuaciones para las variaciones de longitud y tiempo fueron concebidas de tal manera que cualquier método posible de medir la velocidad de la luz, desde cualquier sistema de referencia, diera siempre el mismo resultado. Es fácil darse cuenta de por qué los físicos no se entusiasmaron con esta teoría. Era *ad hoc* en el pleno sentido de la palabra. Parecía poco más que un intento desesperado para seguir sacando partido de las rentas de la teoría del éter. No existía ninguna manera imaginable de confirmarla o refutarla.

Los físicos encontraban difícil de creer que, en caso de que hubiera viento de éter, la naturaleza iba a tomar tantas curiosas, drásticas, casi traviesas medidas para evitar que fuera detectado. Arthur Stanley Eddington, un distinguido astrónomo británico que fue uno de los admiradores más tempranos de la obra de Einstein, describió atinadamente la situación citando la siguiente estrofa de la canción del caballero blanco en *Alicia a través del espejo* de Lewis Carroll:

> «Pero yo tenía un plan:
> teñirme la barba de verde
> y usar siempre un abanico tan grande
> que ya jamás pudiera verse.»

La nueva teoría de Lorentz, con sus contracciones de tiempo y longitud, parece casi tan absurda como el plan del



caballero blanco. Pero, por más que lo intentaron, los físicos fueron incapaces de concebir un plan mejor.

En el siguiente capítulo hablaremos de cómo la teoría de la relatividad especial de Einstein proporcionó una brillante salida para escapar de toda esta extraordinaria confusión.

III. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL (I)

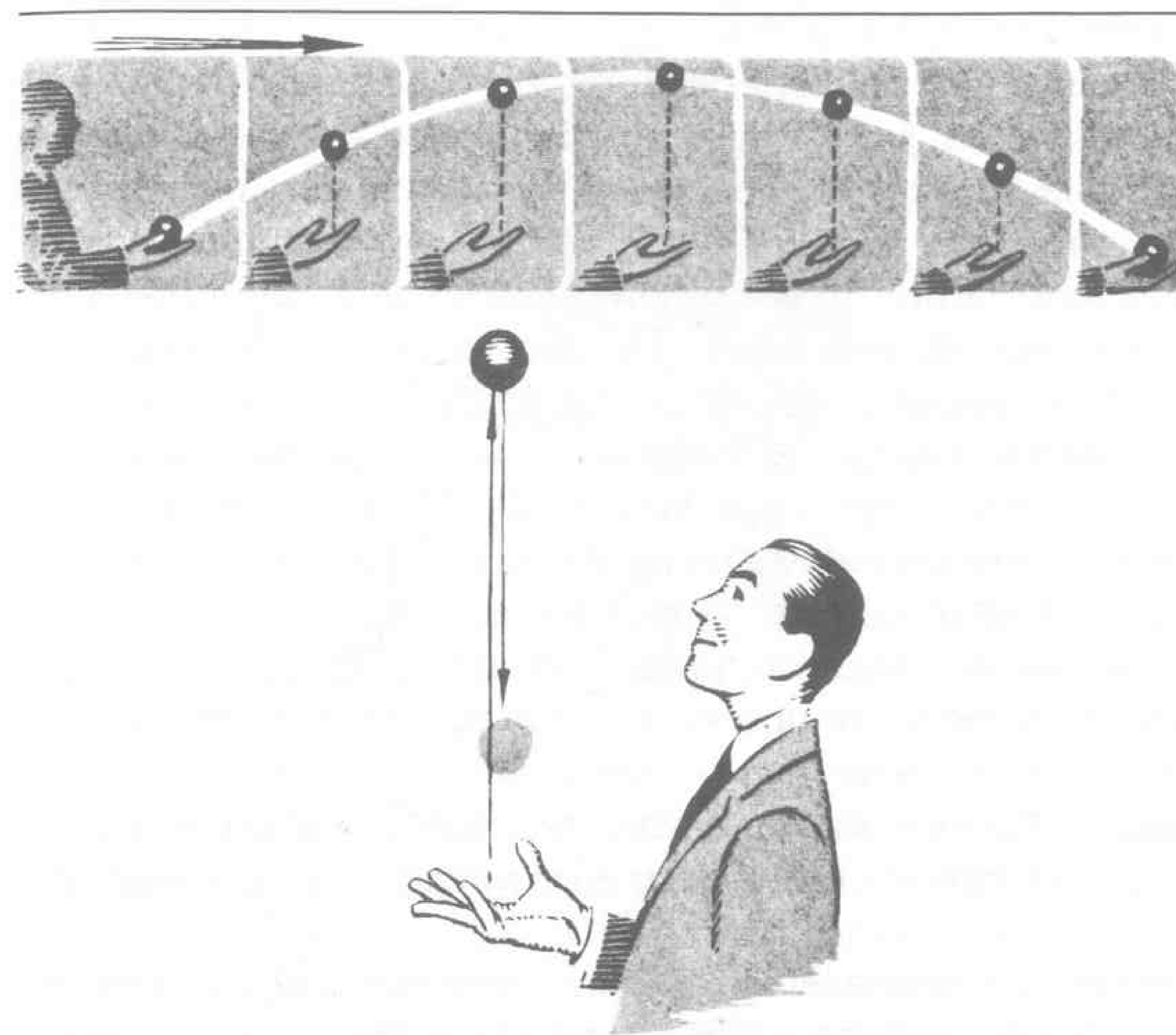
En 1905, cuando Albert Einstein publicó su famoso artículo sobre lo que posteriormente se conocería como la teoría de la relatividad, era un hombre casado de veintiséis años de edad que trabajaba para la oficina suiza de patentes en Berna. Su carrera como estudiante de física en el Instituto Politécnico de Zurich no había sido particularmente brillante. Había preferido dedicar su tiempo a leer, pensar y soñar en sus propias especulaciones en vez de llenar su mente con hechos no esenciales a fin de aprobar exámenes con notas sobresalientes. Intentó enseñar física, pero no conservó sus empleos como profesor durante mucho tiempo.

Sin embargo, desde muy temprana edad, Einstein había pensado profundamente en las leyes fundamentales de la naturaleza. Más tarde recordaría las dos cosas que más le asombraron en su infancia: una brújula magnética que le había enseñado su padre cuando tenía cuatro o cinco años y un libro de texto de geometría que había leído a los doce años de edad. Estas dos "maravillas" son muy significativas y de alguna forma simbolizan la obra de Einstein: la brújula es un símbolo de geometría física, la estructura de ese "inmenso mundo" que está ahí fuera, sobre el cual nunca podemos estar absolutamente seguros; el libro es el símbolo de la geometría pura, una estructura que es absolutamente verdadera, pero

que es independiente del mundo real. Antes de los dieciséis años, Einstein ya había adquirido, en gran medida gracias a su propio esfuerzo, una sólida comprensión de las matemáticas básicas, incluyendo la geometría analítica y el cálculo infinitesimal.

Mientras Einstein trabajaba en la oficina de patentes, leía y pensaba en todo tipo de problemas desconcertantes relacionados con la luz y el movimiento. El origen de su teoría especial se encuentra en un brillante intento de dar cuenta de una amplia variedad de experimentos sin explicar, de los cuales el experimento de Michelson-Morley era el más famoso. Es importante darse cuenta de que se habían realizado muchos otros experimentos que habían creado una situación altamente insatisfactoria con respecto a la teoría de los fenómenos electromagnéticos. Si el experimento de Michelson-Morley no se hubiera llevado a cabo, la teoría especial se hubiera formulado igualmente. El propio Einstein hablaría más tarde del pequeño papel que este experimento desempeñó en el desarrollo de su teoría. Desde luego, si Michelson y Morley hubieran detectado un viento de éter, la teoría especial hubiera sido rechazada desde el primer instante. Pero insistimos en que el resultado negativo de este experimento fue únicamente una más entre las muchas cosas que condujeron a Einstein a su teoría.

Hemos visto cómo Lorentz y FitzGerald habían intentado salvar la teoría del viento de éter suponiendo que la presión del éter, de una forma todavía incomprendida, producía la contracción física de todos los objetos en movimiento. Einstein, siguiendo los pasos de Ernst Mach, tomó un camino más lúcido. La razón, según Einstein, por la cual Michelson y Morley fueron incapaces de detectar el viento de éter es simplemente que *no existe tal viento de éter*. En ningún momento afirmó que el éter no existe. Simplemente que el éter, si existe, es totalmente inútil para medir el movimiento unifor-



me. En años recientes, un buen número de físicos preeminentes han propuesto recuperar el término “éter”, aunque no en el antiguo sentido de un sistema de referencia inmóvil.

La física clásica, la física de Isaac Newton, establece claramente que si nos encontramos encima de un objeto que se mueve uniformemente, digamos un vagón de tren con todas las ventanillas tapadas de modo que no se pueda ver el paisaje, no existe ningún experimento mecánico por medio del cual se pueda demostrar que nos estamos moviendo. (Se supone, desde luego, que el movimiento es perfectamente suave, sin traqueteos ni balanceos que puedan delatarlo.) Si dentro del tren se lanza una pelota hacia arriba, vuelve a caer

verticalmente hacia abajo. Esto es exactamente lo que sucedería si el tren permaneciera en reposo. Si un observador fuera del vagón, junto a la vía, pudiera ver el interior del vagón, vería la trayectoria de la pelota como una curva. Pero para nosotros, que estamos en el vagón, la pelota se mueve verticalmente arriba y abajo. Afortunadamente, los objetos se comportan de esta forma. De otro modo, nunca podríamos practicar deportes como el tenis. Cada vez que se lanzara la pelota hacia arriba, el suelo se movería dejándola atrás.

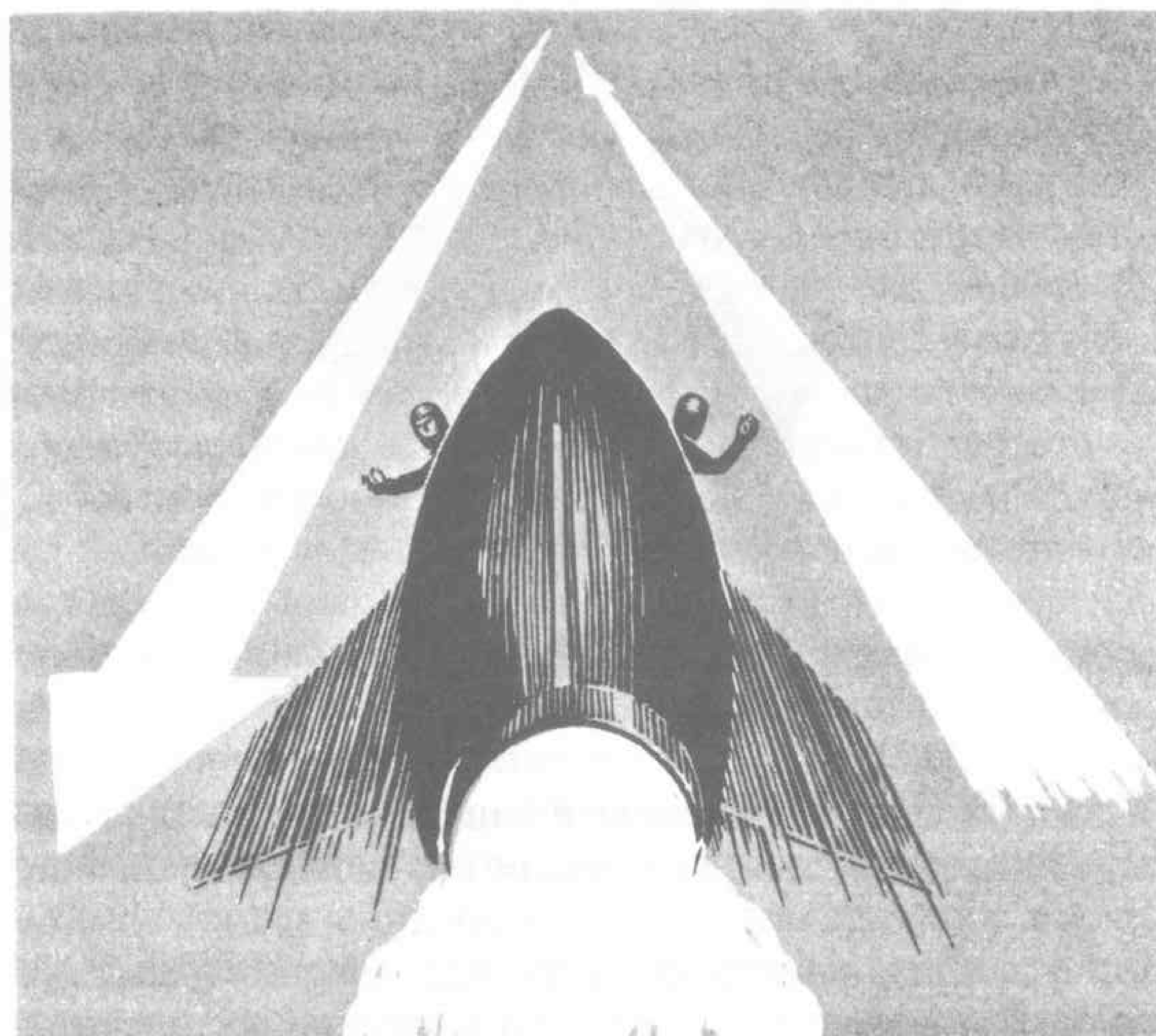
La teoría especial de la relatividad lleva la relatividad clásica de Newton todavía un paso más allá. Dice que además de ser imposible detectar el movimiento del tren mediante un experimento *mecánico,* es también imposible detectar su movimiento mediante un experimento *óptico,* más precisamente, un experimento con radiación electromagnética. La teoría especial puede resumirse en la siguiente frase: no es posible medir el movimiento uniforme de ninguna manera absoluta. Si nos encontramos dentro de un tren que se mueve suavemente con movimiento uniforme, tenemos que atisbar a través de una ventana y mirar hacia algún otro objeto, digamos un poste de teléfonos, para asegurarnos de que nos estamos moviendo. Pero ni siquiera entonces podremos afirmar positivamente si es el tren el que se mueve dejando atrás el poste, o si es el poste el que se mueve dejando atrás el tren. Sólo podremos decir que el suelo y el tren están en movimiento relativo uniforme.

Nótese la constante repetición en el párrafo anterior de la palabra "uniforme". Movimiento uniforme es movimiento en línea recta a velocidad constante. Movimiento no uniforme o *acelerado* es movimiento que se hace más rápido o más lento (cuando la velocidad disminuye se considera que la aceleración es negativa), o movimiento a lo largo de un camino que no es una línea recta. La teoría de la relatividad especial no tiene nada nuevo que decir acerca del movimiento acelerado.



La relatividad del movimiento uniforme parece algo bastante inocente, pero el hecho es que nos sumerge en un mundo que, a primera vista, se parece mucho al mundo absurdo de Alicia detrás del espejo. Si no existe ninguna manera de medir el movimiento uniforme con respecto a un sistema de referencia fijo y universal como el éter, entonces el comportamiento de la luz debe ser absolutamente fantástico, cosa totalmente contraria a lo que indican los experimentos.

Considérese un astronauta en una nave espacial que corre junto a un rayo de luz. Supongamos que la nave se mueve a una velocidad igual a la mitad de la velocidad de la luz. El astronauta se dará cuenta, si hace las mediciones oportunas, de que el rayo continúa adelantándolo a la velocidad usual de 299.800 kilómetros por segundo. Piénsese en ello un momento y se estará de acuerdo en que es lo que cabe esperar si no hay viento de éter. Si el astronauta descubriera que la luz es más lenta con respecto a su movimiento, estaría con ello detectando el viento de éter que Michelson y Morley habían buscado infructuosamente. De modo semejante, si su nave



espacial viaja directamente hacia una fuente de luz que se mueve a una velocidad igual a la mitad de la de la luz, ¿será el rayo que se aproxima hacia él dos veces más rápido? No. El rayo se acerca hacia él igualmente a la velocidad de 299.800 kilómetros por segundo. Sea cual fuere su movimiento con respecto al rayo de luz, siempre obtendrá con sus medidas la misma velocidad.

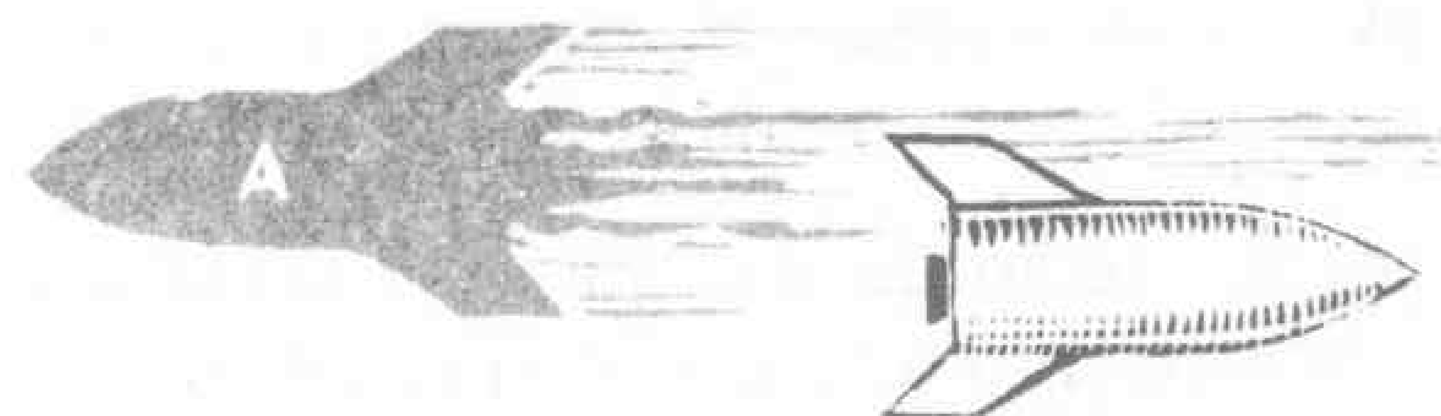
Con frecuencia se oye decir que la teoría de la relatividad convierte todas las cosas de la física en relativas, que hace desaparecer el absoluto. Nada más lejos de la realidad. Convierte en relativas algunas cosas que previamente se pensaba que eran absolutas, pero al hacerlo introduce nuevos absolutos. En el marco de la física clásica, la velocidad de la luz es

relativa en el sentido de que debe modificarse según el movimiento del observador. En el marco de la teoría de la relatividad especial, la velocidad de la luz es un nuevo absoluto. Independientemente de cómo se muevan la fuente de luz y el observador, la velocidad relativa al observador siempre es la misma.

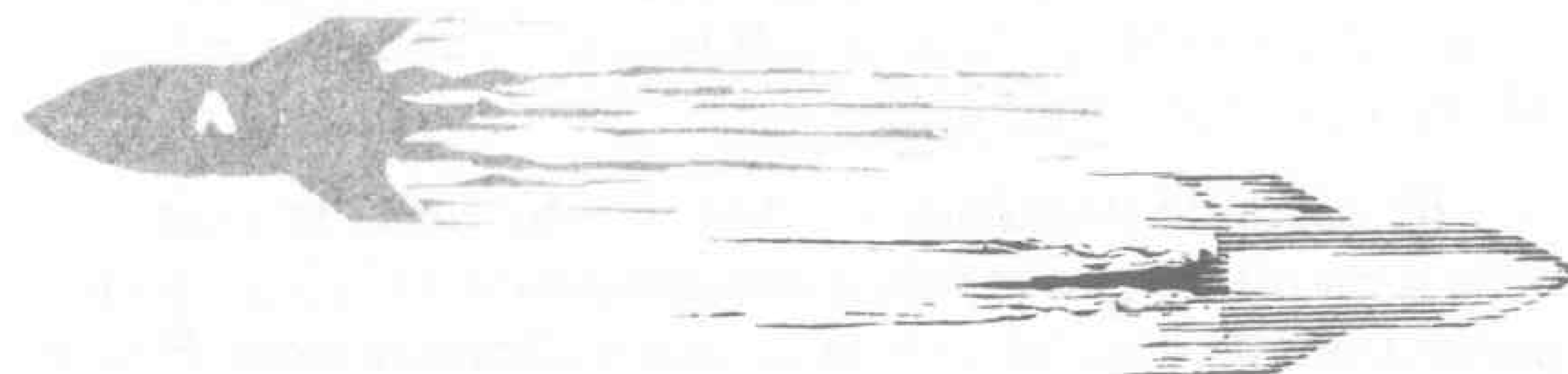
Imagínense dos naves espaciales, A y B. No hay nada en el Cosmos excepto estas dos naves. Se mueven en sentidos opuestos a velocidad uniforme. ¿Existe algún método mediante el cual los astronautas en ambas naves puedan determinar cuál de las siguientes tres situaciones es la "verdadera" o "absoluta"?



1. La nave A está en reposo y la B en movimiento.



2. La nave B está en reposo y la A en movimiento.



3. Ambas se están moviendo.

La respuesta de Einstein es negativa. No existe ninguna manera de determinarlo. Un astronauta de una de las dos naves puede, si lo desea, elegir la nave A como sistema fijo de referencia. No hay ningún tipo de experimento, ni siquiera experimentos con luz u otros fenómenos eléctricos o magnéticos, que demuestre que tal elección es errónea. Lo mismo ocurre si elige la nave B como sistema de referencia. Si prefiere considerar que las dos naves se están moviendo, elige simplemente un sistema de referencia externo a ambas; un punto respecto del cual ambas naves se encuentren en movimiento. No tiene sentido decir que una de estas tres elecciones sea la "verdadera" y las otras "falsas". Hablar del movimiento absoluto de una de las dos naves es hablar de algo que carece de sentido. Existe una única realidad: un movimiento relativo que hace que las dos naves se separen a velocidad uniforme.

En un libro de estas características es imposible ahondar en los detalles técnicos de la teoría especial de la relatividad, especialmente detalles de tipo matemático. Nos debemos contentar con mencionar algunas de las más sorprendentes consecuencias que se derivan lógicamente de lo que Einstein, en su primer artículo sobre relatividad, denomina los dos "postulados fundamentales" de su teoría:

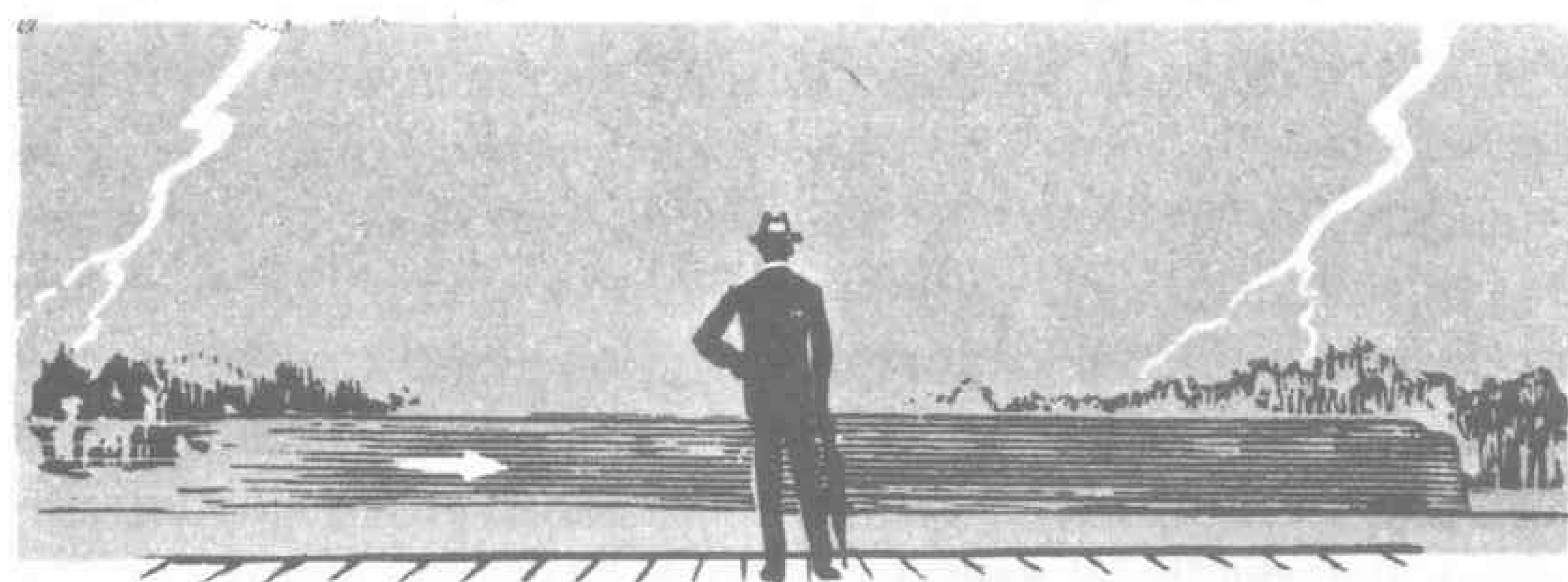
1. No existe ningún medio de determinar si un objeto está en reposo o en movimiento uniforme con respecto a un éter fijo.
2. Sea cual fuere el movimiento de la fuente que la emite, la luz siempre se mueve a través del espacio vacío a la misma velocidad constante.

(El segundo postulado no debe confundirse, tal como sucede a menudo, con la velocidad constante de la luz con respecto a un *observador* que se mueve uniformemente. Ésta es una *deducción* a partir de los postulados. Nótese también que solamente nos referimos a la velocidad de la luz en el vacío.

La luz viaja más despacio en medios transparentes como el aire o el vidrio, de otro modo ninguna lente sería capaz de refractarla.)

Otros físicos habían considerado con anterioridad estos dos postulados. Lorentz había intentado reconciliarlos con su teoría según la cual las longitudes y los tiempos absolutos se veían alterados por la presión del viento de éter. La mayoría de los físicos pensaban que esto constituía una violación demasiado radical del sentido común. Preferían creer que los postulados eran incompatibles y que al menos uno de ellos debía ser falso. Einstein analizó el problema mucho más profundamente. Según él, los postulados son incompatibles sólo si nos aferramos al punto de vista clásico según el cual la longitud y el tiempo son absolutos. Cuando Einstein publicó su teoría, no sabía que Lorentz había razonado en términos semejantes, pero, al igual que Lorentz, se dio cuenta de que las mediciones de la longitud y el tiempo tenían que depender del estado de movimiento relativo entre el objeto y el observador. Sin embargo, Lorentz se quedó a medio camino. Mantuvo las nociones de longitud y tiempo absolutos para objetos en reposo. Él pensaba que el viento de éter distorsionaba la "verdadera" longitud y el "verdadero" tiempo. Einstein llegó hasta el final. Negó el viento de éter. Negó que tuviera sentido hablar de tiempo absoluto o de longitud absoluta. Ésta es la clave de la teoría de la relatividad especial de Einstein. Al formularla desveló muchas incógnitas.

Para explicar su teoría especial de una manera no técnica, Einstein propuso el siguiente experimento ideal. Supongamos que un observador M se encuentra junto a una vía de ferrocarril. A una cierta distancia a lo largo de la vía se encuentra el punto A. A la misma distancia en la otra dirección se encuentra el punto B. Dos rayos caen simultáneamente sobre los puntos A y B. El observador sabe que estos dos sucesos son simultáneos porque observa los dos destellos de



luz en el mismo instante. Dado que se encuentra en el punto medio entre los dos puntos y que la luz viaja a velocidad constante, concluye que los dos rayos cayeron simultáneamente en los dos puntos.

Supongamos ahora que cuando caen los dos rayos pasa un tren a gran velocidad en la dirección de A hacia B. En el instante en que se producen los dos destellos, un observador en el tren —llamémosle M′— se encuentra alineado exactamente con el observador M situado en la vía. Dado que M′ se mueve hacia uno de los destellos y se aleja del otro, verá el destello en B antes que el destello en A. Sabiendo que se encuentra en movimiento, tendrá en cuenta la velocidad de la luz. Hará sus cálculos y llegará también a la conclusión de que los dos rayos cayeron simultáneamente.

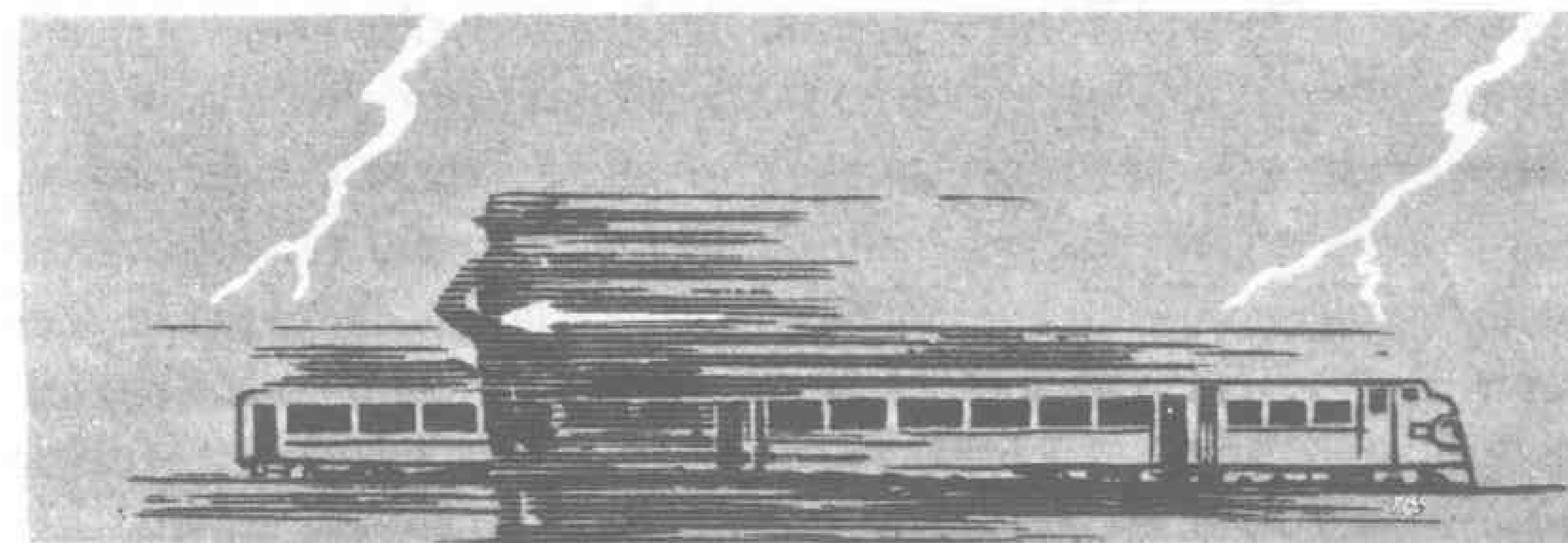
Hasta aquí todo es correcto. Ahora bien, de acuerdo con los postulados fundamentales de la teoría especial (confirmados por el experimento de Michelson-Morley), podemos perfectamente suponer que es el tren el que se encuentra en reposo mientras el suelo se mueve rápidamente hacia atrás bajo sus ruedas. Desde *este* punto de vista, M′, el observador en el tren, llegará a la conclusión de que el destello en B, de hecho, se produjo antes que el destello en A, justamente como lo observó. Sabe que se encuentra a mitad de camino



entre los dos destellos y dado que se considera a sí mismo en reposo está forzado a admitir que el destello que vio primero se produjo antes que el destello que vio en segundo lugar.

El observador M, junto a la vía, estará de acuerdo. Es cierto que ve los destellos simultáneamente, pero ahora es *él* quien se está moviendo. Si tiene en cuenta la velocidad de la luz y el hecho de que se mueve hacia A y se aleja de B, sus cálculos le indicarán que el destello en B debe haberse producido en primer lugar.

Debemos admitir, por tanto, que no hay una respuesta absoluta a la pregunta de si los destellos son o no simultáneos. La respuesta depende de la elección de un sistema de referencia. Desde luego, si dos sucesos ocurren simultáneamente *en el mismo punto,* se puede decir de manera absoluta

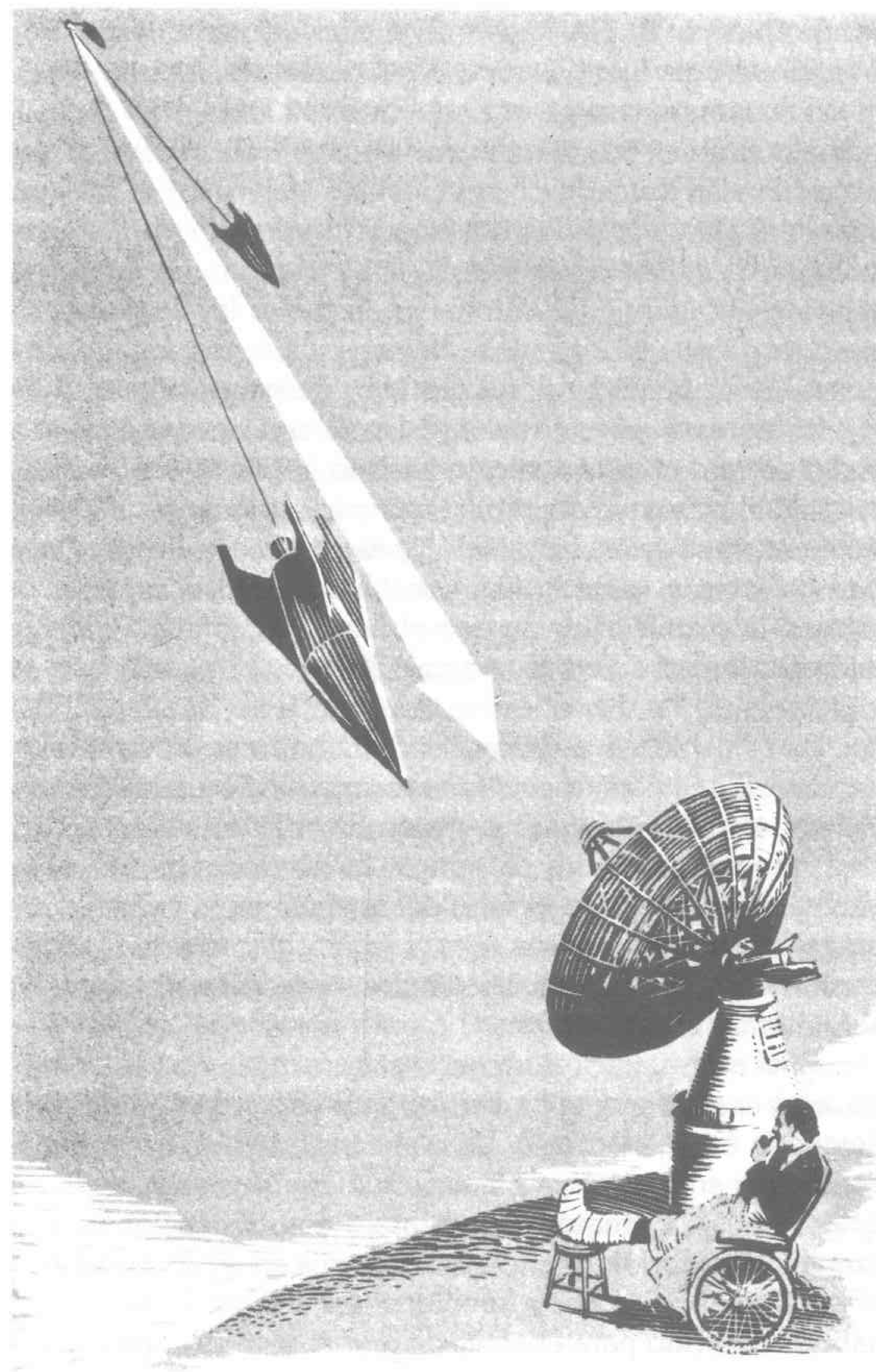


que son simultáneos. Cuando dos aeroplanos colisionan en el aire, no existe ningún sistema de referencia respecto del cual el choque de los dos aviones no sea simultáneo. Pero cuanto mayor es la distancia entre dos sucesos, mayor es la dificultad de determinar su simultaneidad. Es importante entender que no se trata meramente de una imposibilidad de saber lo que ocurre en realidad, *porque no hay tal realidad*. No existe un tiempo absoluto universal respecto del cual se pueda medir la simultaneidad absoluta. La simultaneidad absoluta de sucesos a distancia es un concepto vacío.

Para darnos cuenta de cuán radicales son estas ideas, consideremos un experimento ideal en el que entran en juego grandes distancias y enormes velocidades. Supongamos que alguien en el planeta X, en otra parte de nuestra galaxia, intenta comunicarse con la Tierra. Esta persona envía un mensaje por radio, esto es, una onda electromagnética que viaja por el espacio a la velocidad de la luz. Supongamos que la Tierra y el planeta X se encuentran a diez años luz de distancia. Así, el mensaje tardará diez años en llegar hasta la Tierra. Doce años antes de que un radioastrónomo en la Tierra reciba el mensaje, se le ha concedido el premio Nobel. La teoría especial nos permite afirmar, de modo absoluto, que el astrónomo ha recibido este premio *antes* de que el mensaje fuera emitido desde el planeta X.

Diez minutos después de recibir el mensaje, el astrónomo estornuda. La teoría especial también nos permite afirmar, de modo absoluto y para todos los observadores en cualquier marco de referencia, que el astrónomo estornudó *después* de que el mensaje fuera emitido desde el planeta X.

Ahora supongamos que en algún momento del período de diez años, cuando el mensaje por radio se dirigía a la Tierra (digamos tres años antes de que el mensaje fuera recibido), el astrónomo se cae de su radiotelescopio y se rompe una pierna. La teoría especial *no* nos permite afirmar de



modo absoluto que se haya roto la pierna antes o después de que el mensaje fuera emitido en el planeta X.

La razón es la siguiente: un observador que abandone el planeta X al mismo tiempo que se emite el mensaje y que viaje hacia la Tierra a poca velocidad (relativa a la misma), concluirá (de acuerdo con sus mediciones del paso del tiempo) que el astrónomo se rompió la pierna *después* de que se emitiera el mensaje. Desde luego, llegará a la Tierra mucho después de que el mensaje se haya recibido, quizá siglos después. Pero cuando haga sus cálculos, y siempre según su reloj, la fecha en que el mensaje fue emitido es anterior a la fecha en que el astrónomo se rompió la pierna. En cambio, otro observador que abandone también el planeta X al mismo tiempo que se emite el mensaje, pero que viaje a una velocidad próxima a la de la luz, concluirá que el astrónomo se rompió la pierna *antes* de que el mensaje fuera emitido. En lugar de tardar siglos en realizar el viaje, lo completará en poco más de los diez años medidos por los relojes en la Tierra. Pero, debido a la dilatación del tiempo en la velocísima nave espacial, al astronauta le parecerá que ha completado el viaje en tan sólo unos pocos meses. En la Tierra se le comunicará que el astrónomo se rompió la pierna unos tres años atrás. De acuerdo con el reloj del astronauta, el mensaje fue emitido uno pocos meses atrás. Llegará, por tanto, a la conclusión de que la pierna se rompió antes de que el mensaje abandonara el planeta X.

Si el astronauta viajara tan rápido como la luz (desde luego, esto es meramente hipotético y no es posible), su reloj se detendría completamente. Le parecería que había completado el viaje en un tiempo cero. Desde este punto de vista, los dos sucesos, la emisión del mensaje y su recepción, serían simultáneos. *Todos* los sucesos ocurridos en la Tierra durante el período de diez años (medidos por relojes en la Tierra), habrían ocurrido para él antes de que el mensaje fuera emitido. Ahora bien, de acuerdo con la teoría especial no existe ningún sistema de referencia "privilegiado": no existe ninguna razón para preferir el punto de vista de un observador en lugar de otro. Los cálculos efectuados por el astronauta veloz son tan legítimos, tan "verdaderos", como los cálculos efectuados por el astronauta despacioso. No existe ningún tiempo absoluto universal al que pueda recurrirse para establecer las diferencias entre ellos. La palabra "ahora" sólo tiene sentido en el lugar que usted ocupa. No se puede suponer que existe un "ahora" simultáneo para todos los lugares del Universo.

Esta ruptura con la noción clásica de simultaneidad absoluta es sin ninguna duda el aspecto inesperado más "bello" de la teoría especial (la frase "bello aspecto inesperado" está extraída de una conferencia sobre relatividad pronunciada por el físico nuclear Edward Teller*). Newton dio por sentado que existía un tiempo universal común a todo el Cosmos. También lo supusieron Lorentz y Poincaré. ¡*Ésta* fue la razón que les impidió descubrir la teoría especial antes que Einstein! Einstein tuvo la genialidad de ver que la teoría no podía ser formulada de una manera comprensiva y lógicamente consistente sin renunciar por completo a la noción de un tiempo cósmico universal.

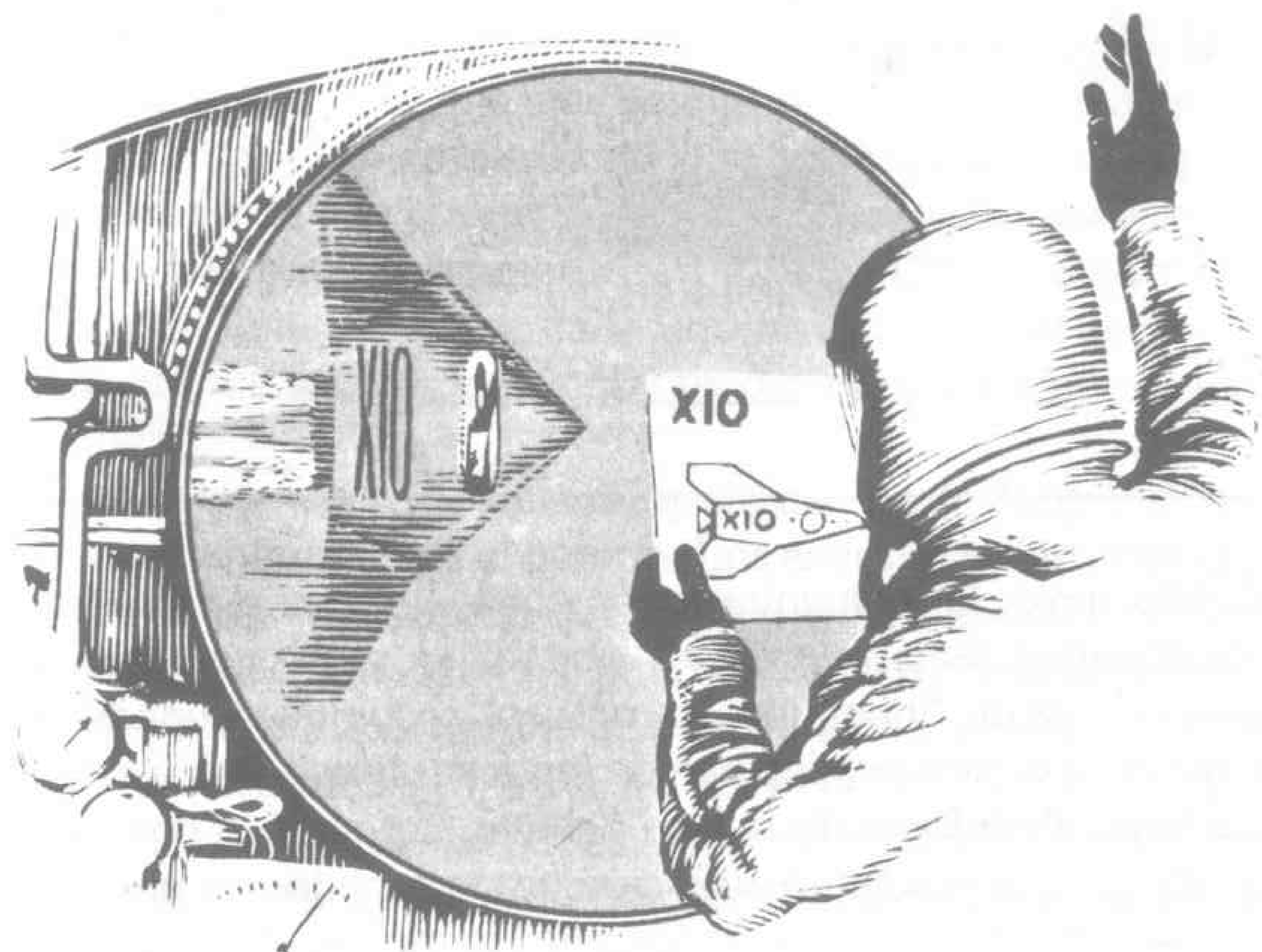
Existen, dice Einstein, solamente tiempos locales. En la Tierra, por ejemplo, todos somos transportados a través del espacio a la misma velocidad; por consiguiente, todos nuestros relojes registran el mismo "tiempo terrestre". Un tiempo local de estas características, para un objeto en movimiento como la Tierra, recibe el nombre de "tiempo propio" del objeto. Siguen existiendo un "antes" y un "después" absolutos (evidentemente ningún astronauta puede morir antes de nacer), pero cuando los sucesos están separados por grandes distancias, hay largos intervalos de tiempo dentro de los cua-

* Esta conferencia fue reproducida con el título de "The Geometry of Space and Time" en la revista *The Mathematics Teacher* (noviembre, 1961).

les no es posible decir cuál de dos sucesos es anterior o posterior al otro. La respuesta depende del movimiento del observador con respecto a los dos sucesos. La decisión a que llega un observador es tan “correcta” como la decisión distinta a que ha llegado otro observador en otro estado de movimiento. Esto se sigue lógicamente de los dos postulados fundamentales de la teoría especial.

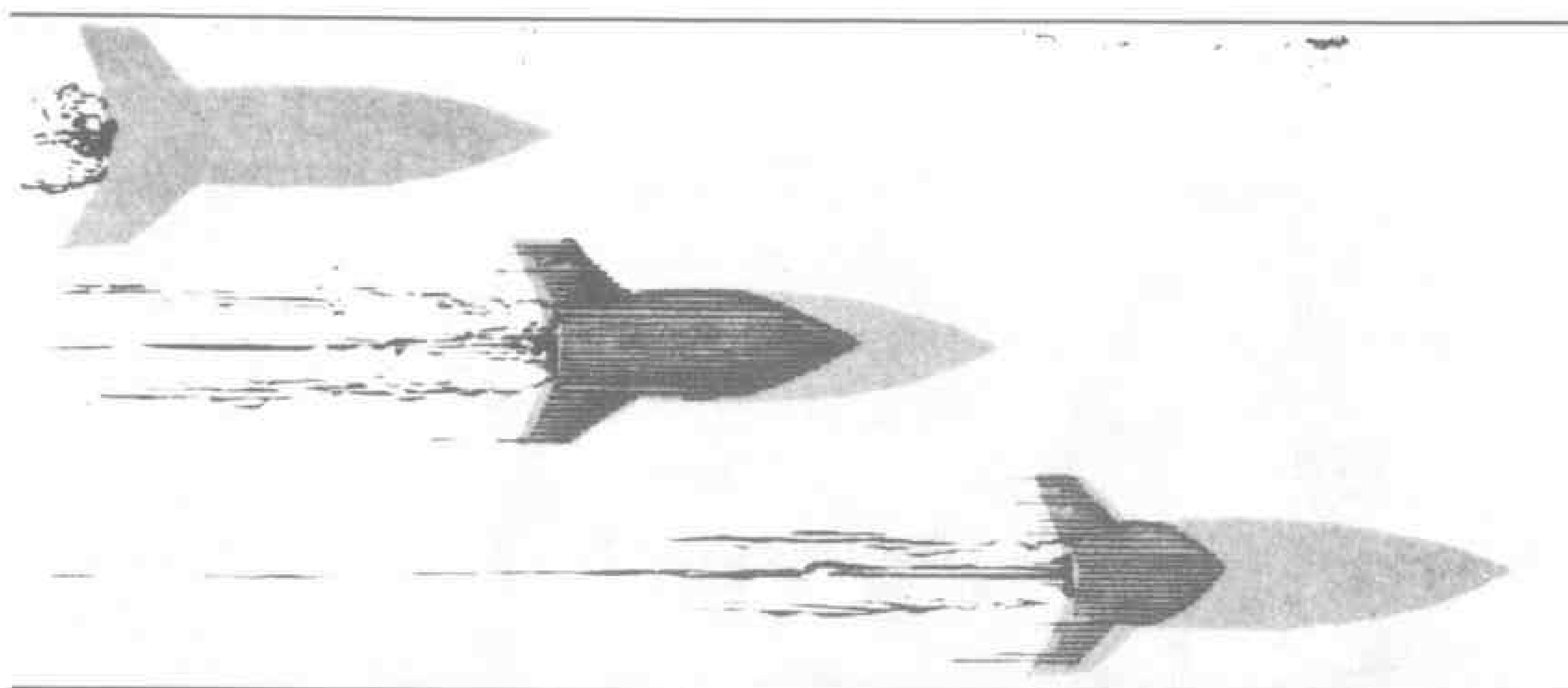
Al derrumbarse el concepto de simultaneidad, otros conceptos caen con él. El tiempo se hace relativo, ya que los observadores difieren en sus estimaciones del tiempo que separa los dos mismos sucesos. La longitud también se vuelve relativa. La longitud de un tren en movimiento no puede ser medida sin conocer exactamente dónde se encuentran su parte anterior y su parte posterior *en el mismo instante*. Si alguien informa que a la 1 de la tarde la parte frontal del tren se encontraba exactamente delante de él y que la parte trasera se encontraba a un kilómetro de distancia en algún momento entre las 12,59 y la 1,01, no hay manera de determinar la longitud exacta del tren. En otras palabras, sin un método para establecer la simultaneidad exacta es imposible obtener mediciones precisas de distancias y longitudes de objetos en movimiento. En ausencia de tal método, las longitudes de los objetos en movimiento pasan a depender de la elección de un sistema de referencia determinado.

Por ejemplo, si dos naves espaciales se encuentran en movimiento relativo, un observador en cada una de ellas verá que la otra se ha contraído ligeramente en la dirección del movimiento. A velocidades ordinarias este cambio es extremadamente minúsculo, totalmente imperceptible. La Tierra, que se mueve a una velocidad de 30 kilómetros por segundo alrededor del Sol, le parecería a un observador en reposo con respecto al Sol que se habría contraído tan sólo unos cuantos centímetros. Sin embargo, cuando las velocidades relativas son muy grandes, los cambios ya no son despreciables. Afor-

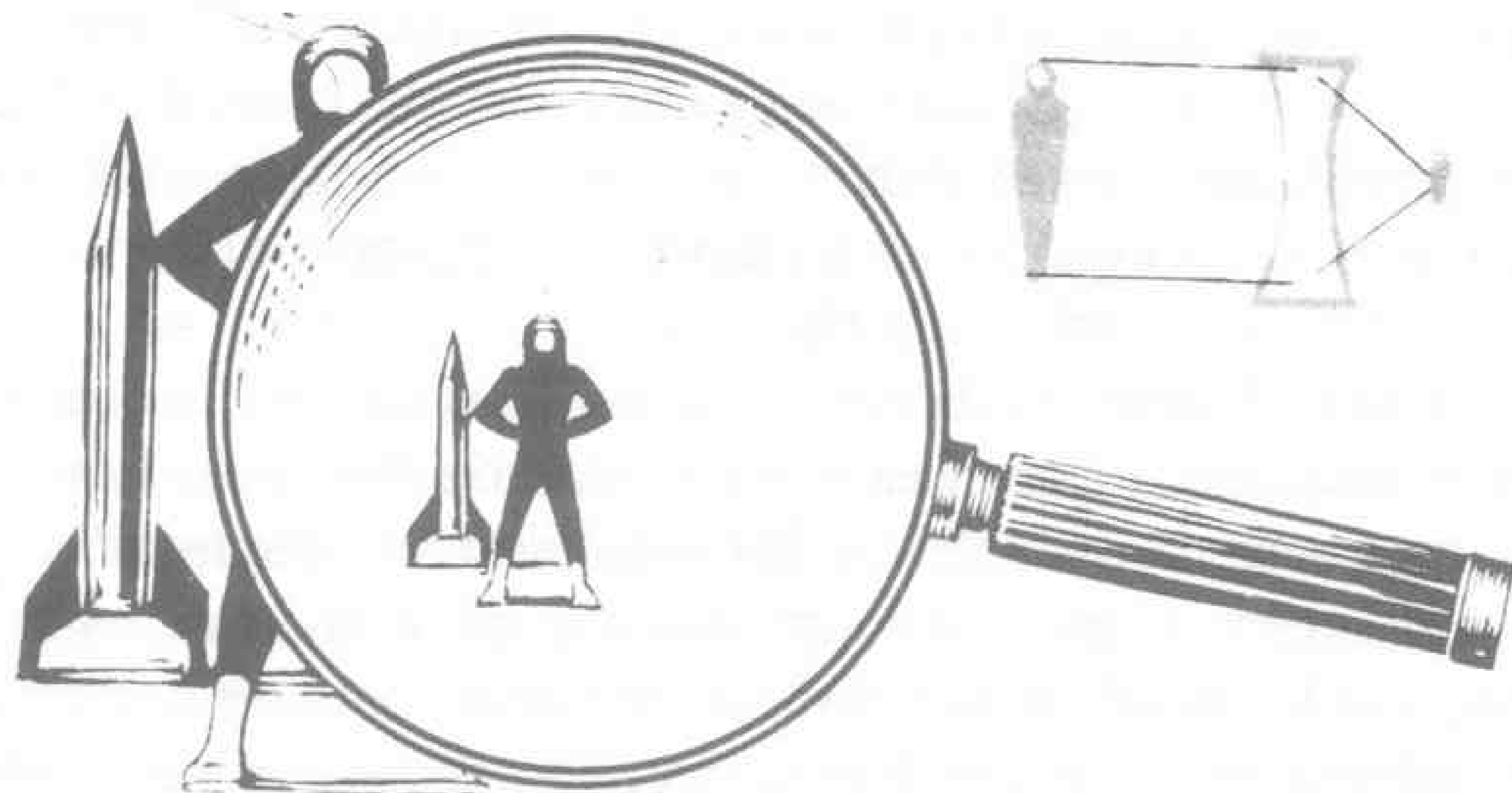


tunadamente, la fórmula para la contracción concebida por FitzGerald y Lorentz para explicar el experimento de Michelson-Morley puede ser aplicada aquí. En la teoría de la relatividad se le sigue llamando la contracción de Lorentz-FitzGerald, pero sería quizá más conveniente que se le diera otro nombre, puesto que Einstein dio a esta fórmula una interpretación fundamentalmente distinta.

Para Lorentz y FitzGerald la contracción era un cambio físico, causado por la presión del viento de éter. Para Einstein, solamente tenía que ver con los resultados de las mediciones: por ejemplo, cuando los astronautas de una nave espacial miden la longitud de la otra. Los observadores en cada nave no detectan ningún cambio de longitud en su propia nave o en los objetos en el interior de la misma. Pero cuando miden



la otra nave, la encuentran más corta. Lorentz y FitzGerald continuaban pensando en los objetos en movimiento como poseedores de "longitudes en reposo" absolutas. Cuando los objetos se contraían, dejaban de tener sus longitudes "reales". Einstein, abandonando la idea del éter, convirtió el concepto de longitud absoluta en algo carente de sentido. Lo que permanece es el concepto de longitud como *resultado de una medida,* longitud que puede variar con la velocidad relativa entre el objeto medido y el observador.



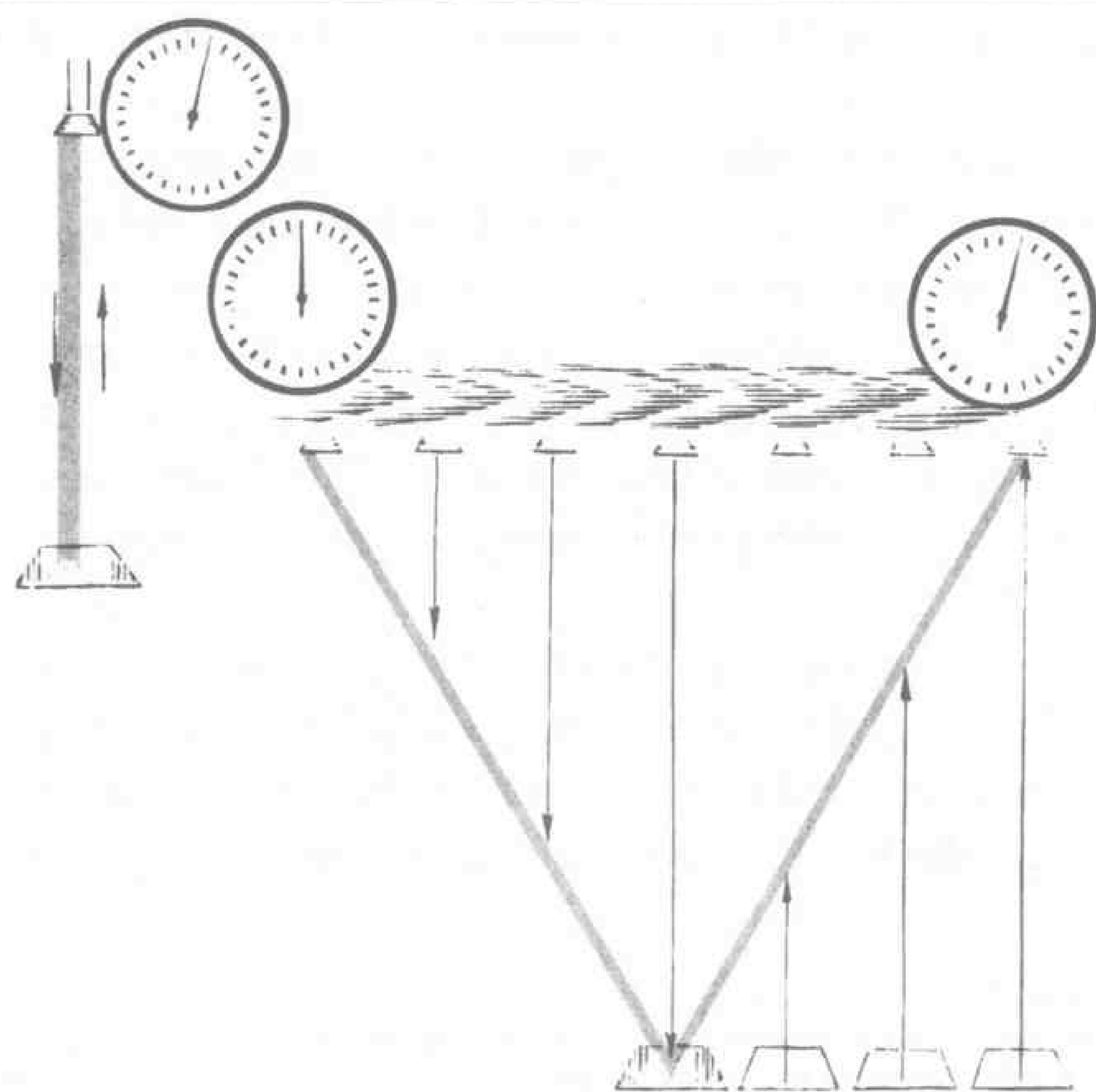
Se puede preguntar: ¿cómo es posible que una nave sea más corta que la otra? La pregunta no está correctamente formulada. La teoría no afirma que una nave sea más corta que la otra; dice simplemente que los astronautas en cada nave *miden* la otra como más corta. Esto es algo muy distinto. Si dos personas permanecen en los dos lados opuestos de una gran lente cóncava, cada uno *ve* al otro más pequeño, pero decir esto no es lo mismo que decir que cada uno *es* más pequeño.

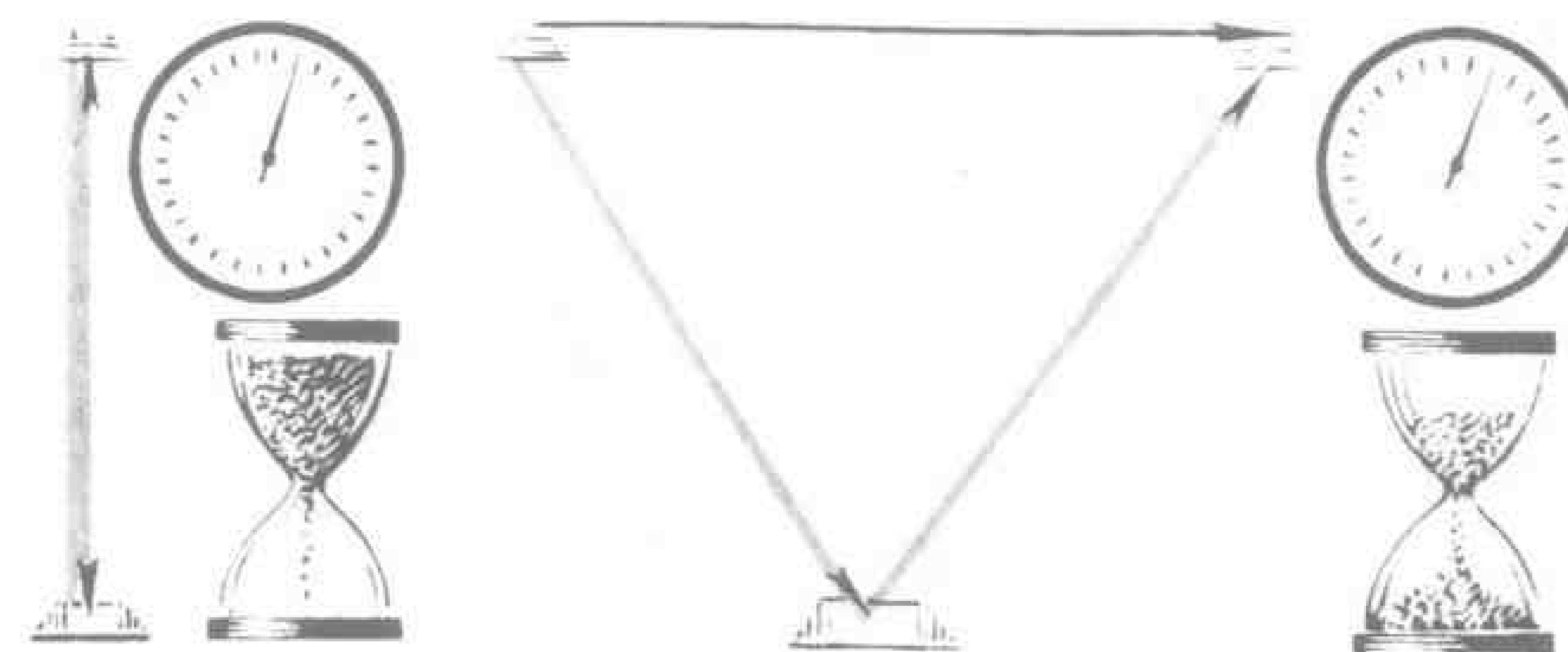
Además de los cambios aparentes en la longitud, hay cambios aparentes en el tiempo. Los astronautas en cada una de las naves encontrarán que los relojes* en la otra nave van más despacio. Un simple experimento ideal nos muestra que así debe ser. Supongamos que nos encontramos en una de las naves espaciales y miramos a través de una ventanilla de la otra. Las dos naves se cruzan con una velocidad uniforme cercana a la de la luz. En el momento de cruzarse, desde el techo de la otra nave se emite un rayo de luz que llega hasta el suelo, donde incide en un espejo y se refleja de nuevo hacia el techo. Nosotros veremos la trayectoria del rayo como una V. Si dispusiéramos de instrumentos suficientemente precisos (por descontado que tales instrumentos no existen), podríamos cronometrar el tiempo que tarda este rayo de luz en recorrer la trayectoria en forma de V. Dividiendo la longitud del camino recorrido por el tiempo, obtendríamos la velocidad de la luz.

Ahora supongamos que mientras cronometramos el rayo de luz a lo largo de la trayectoria en V, otro astronauta en el interior de la segunda nave hace lo mismo. Desde su punto de vista, es decir, suponiendo que *su* nave es el sistema de

* La palabra "reloj" se emplea aquí y a lo largo de todo el libro para indicar cualquier tipo de proceso periódico que no dependa de la gravedad: el movimiento de un reloj de cuerda, el latido de un corazón, etc. Es bueno tener presente que los relojes que dependen de la gravedad, tales como los de péndulo y los de arena, no son de ninguna utilidad en las condiciones descritas.

referencia fijo, la luz viaja simplemente hacia abajo y de nuevo hacia arriba a lo largo de la misma recta vertical, recorriendo un camino más corto que la V observada por nosotros. Cuando divide esta distancia por el tiempo que emplea la luz en recorrer dicha trayectoria vertical, obtiene asimismo la velocidad de la luz. Dado que la velocidad de la luz es constante para todos los observadores, debe obtener exactamente el mismo resultado que nosotros, es decir 299.800 kilómetros por segundo. Sin embargo, la distancia recorrida en el segundo caso es más corta. ¿Cómo puede el resultado ser el mismo? Existe únicamente una explicación posible: su reloj funciona más despacio. Desde luego, la situación es perfectamente simétrica. Si se emite en nuestra nave un rayo de luz de arriba abajo y de nuevo hacia arriba, el otro astro-





nauta verá una trayectoria en forma de V. Deducirá, por tanto, que *nuestro* reloj va más despacio.

El hecho de que estos desconcertantes cambios de longitud y tiempo sean considerados "aparentes" no quiere decir que exista una "verdadera" longitud o un "verdadero" tiempo que "parezcan" distintos a distintos observadores. La longitud y el tiempo son conceptos relativos. No tiene ningún significado hablar de ellos fuera del contexto de la relación entre un objeto determinado y su observador. No tiene sentido decir que un conjunto de medidas es el "correcto" y que otro conjunto de medidas es "erróneo". Cada uno es correcto con respecto al observador que efectúa las mediciones; con respecto a su marco de referencia. *No existe ningún otro sentido según el cual las medidas puedan ser más correctas.* De ningún modo se trata de ilusiones ópticas que deban ser explicadas por un psicólogo. Pueden registrarse con ayuda de instrumentos. No requieren necesariamente un observador *vivo*.

Del mismo modo, la masa es también un concepto relativo. Vamos a ocuparnos de este tema en el próximo capítulo.

IV. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL (II)

Longitud y tiempo, como vimos en el capítulo anterior, son conceptos relativos. Si dos naves espaciales se cruzan a una velocidad uniforme, los observadores de cada nave verán que los astronautas de la otra nave han adelgazado y son más lentos. Si la velocidad relativa es suficientemente grande, les parecerá que los otros se mueven como los actores en una película a cámara lenta. Todos los fenómenos con movimientos periódicos parecerán producirse más despacio: los tonos de los sonidos (serán más graves), los relojes de cuerda, los latidos del corazón, las vibraciones de los átomos, etc. Como Eddington lo expresara en una ocasión, incluso parecerá que los cigarros en la otra nave se consumen más despacio. Un astronauta de un metro ochenta que permaneciera de pie en una nave en movimiento horizontal seguiría aparentando un metro ochenta, pero su cuerpo parecería más delgado en la dirección del movimiento. Si se echara en el suelo con su cuerpo alineado con la dirección del movimiento de la nave, su cuerpo recobraría su anchura normal, pero ahora parecería que se hubiera encogido de la cabeza a los pies.

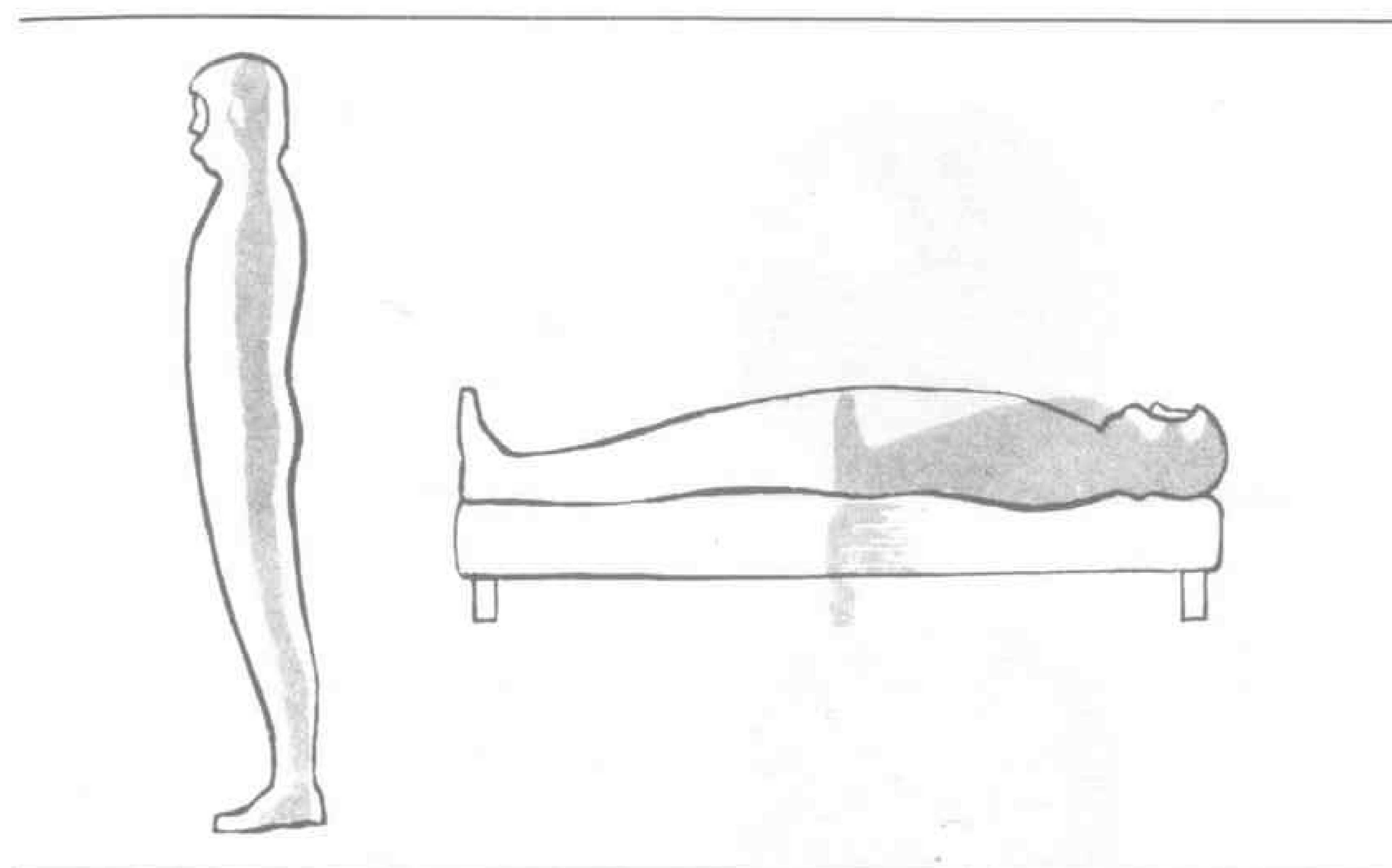
Si dos naves espaciales pudieran cruzarse a una velocidad relativa suficientemente grande como para convertir estos cambios en significativos, toda clase de dificultades técnicas impedirían que los observadores en cualquiera de las dos

naves pudieran *ver* los cambios producidos en la otra. Algunos autores gustan de explicar la relatividad empleando ejemplos demasiado simplificados y exagerados. Estas pintorescas situaciones no describen cambios observables en la práctica, ni por el ojo humano ni por cualquier otro instrumento actualmente conocido. Debe pensarse en ellos como cambios que los astronautas pueden inferir sobre la base de medidas efectuadas con instrumentos suficientemente precisos y después de tener en cuenta debidamente la velocidad de la luz. Cuando nos referimos a un "observador", queremos indicar una persona imaginaria ideal, fija a un sistema específico de referencia, que llega a ciertas conclusiones basándose en sus instrumentos de medida*.

Además de los cambios en longitud y tiempo, hay también cambios relativistas en la masa. La masa, de algún modo, es una medida de la cantidad de materia de un objeto. Aunque una bola de plomo y una de corcho tengan el mismo tamaño, la bola de plomo es más masiva. Contiene una mayor concentración de materia.

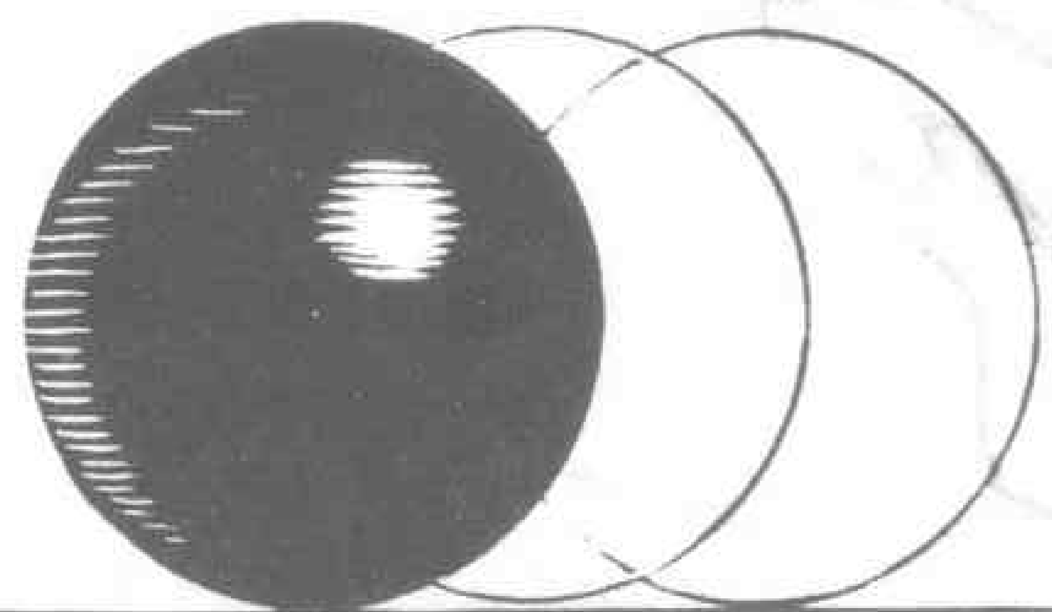
Existen dos maneras de medir la masa de un objeto: pesándolo o determinando la magnitud de la fuerza necesaria para acelerarlo en un determinado valor. El primer método es bastante deficiente, puesto que los resultados varían con la intensidad local de la gravedad. Una bola de plomo transportada hasta la cima de una alta montaña pesará algo menos que antes, aunque su masa siga siendo exactamente la misma. Sobre la Luna, su peso será considerablemente menor

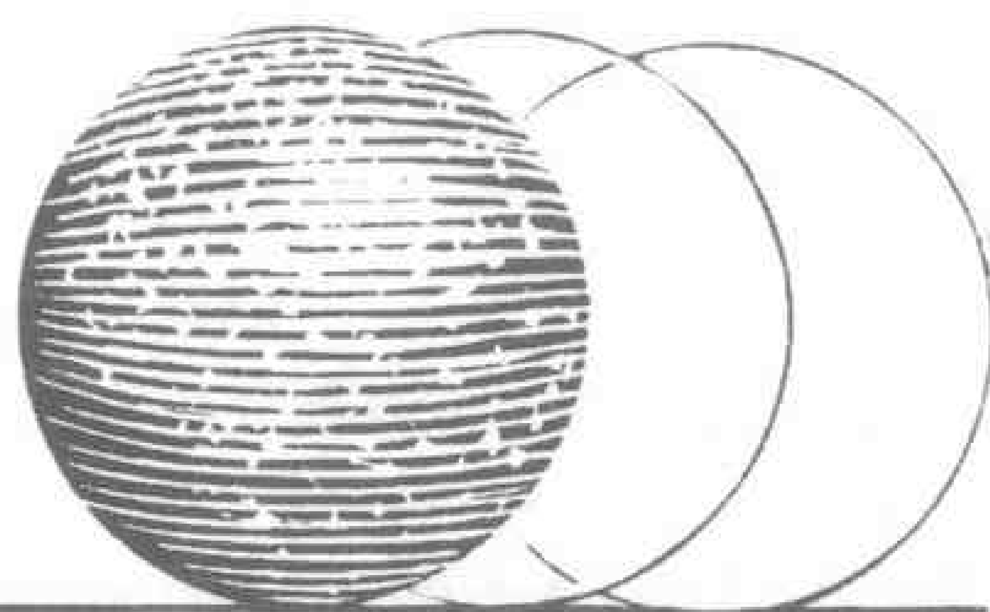
* La apariencia real de un objeto —cómo se vería en una fotografía tomada instantáneamente— cuando éste y el observador pasan uno delante del otro a velocidades relativistas, es un tema complicado que no empezó a estudiarse hasta el año 1959. Las leyes clásicas de la óptica se combinan con las contracciones de Lorentz para dar lugar a resultados sorprendentes. Una esfera, por ejemplo, siempre parece un disco circular. En ciertas condiciones, un cubo parece que haya sido girado. El lector interesado encontrará estos temas tratados más a fondo en los siguientes artículos: James Terrell, "Invisibility of the Lorentz Contraction", *Physical Review* (noviembre, 1959); V. F. Weisskopf, *Physics Today* (septiembre, 1960); G. D. Scott y M. R. Viner, "The Geometrical Appearance of Large Objects Moving at Relativistic Speeds", *American Journal of Physics* (julio, 1965).



que sobre la Tierra. En el planeta Júpiter, en cambio, su peso será considerablemente mayor.

El segundo método de medir la masa nos da siempre el mismo resultado, tanto si nos encontramos sobre la Tierra, sobre la Luna o sobre Júpiter, pero está sujeto a un tipo de variación diferente y más extraño. Para determinar la masa de un objeto en movimiento con ayuda de este método, se debe medir la fuerza necesaria para acelerarlo hasta un determinado valor. Claramente, se necesita ejercer un mayor impulso para poner en movimiento una bola de plomo que una de corcho. La masa medida de este modo se denomina *masa inercial* para distinguirla de la *masa gravitatoria*. Para medir una aceleración hay que efectuar medidas de tiempo y de distancia. La masa inercial de la bola de plomo, por ejemplo, se expresa como la magnitud de la fuerza necesaria para incrementar la velocidad de la bola (distancia por unidad de tiempo) en un cierto valor por unidad de tiempo. Como hemos visto, las medidas del tiempo y de la distancia varían con la velocidad relativa del objeto con respecto al observador.





En consecuencia, las medidas de la masa inercial también pueden variar.

En el capítulo 6 volveremos a hablar de la masa gravitatoria y de su relación con la masa inercial. Aquí nos vamos a referir solamente a la masa inercial medida por un observador. Para observadores en reposo relativo respecto a un objeto —por ejemplo, astronautas que transportan un elefante en una nave espacial—, la masa inercial del objeto es siempre la misma, con independencia de la velocidad de la nave. La masa del elefante medida por tales observadores es su *masa propia* o *masa en reposo*. La masa inercial del mismo elefante, medida por un observador en movimiento con respecto al mismo (por ejemplo, por un observador en la Tierra), es la *masa relativista* del elefante. La masa en reposo de un objeto es siempre la misma. Su masa relativista varía. Ambas son medidas de su masa inercial. En este capítulo nos ocupamos

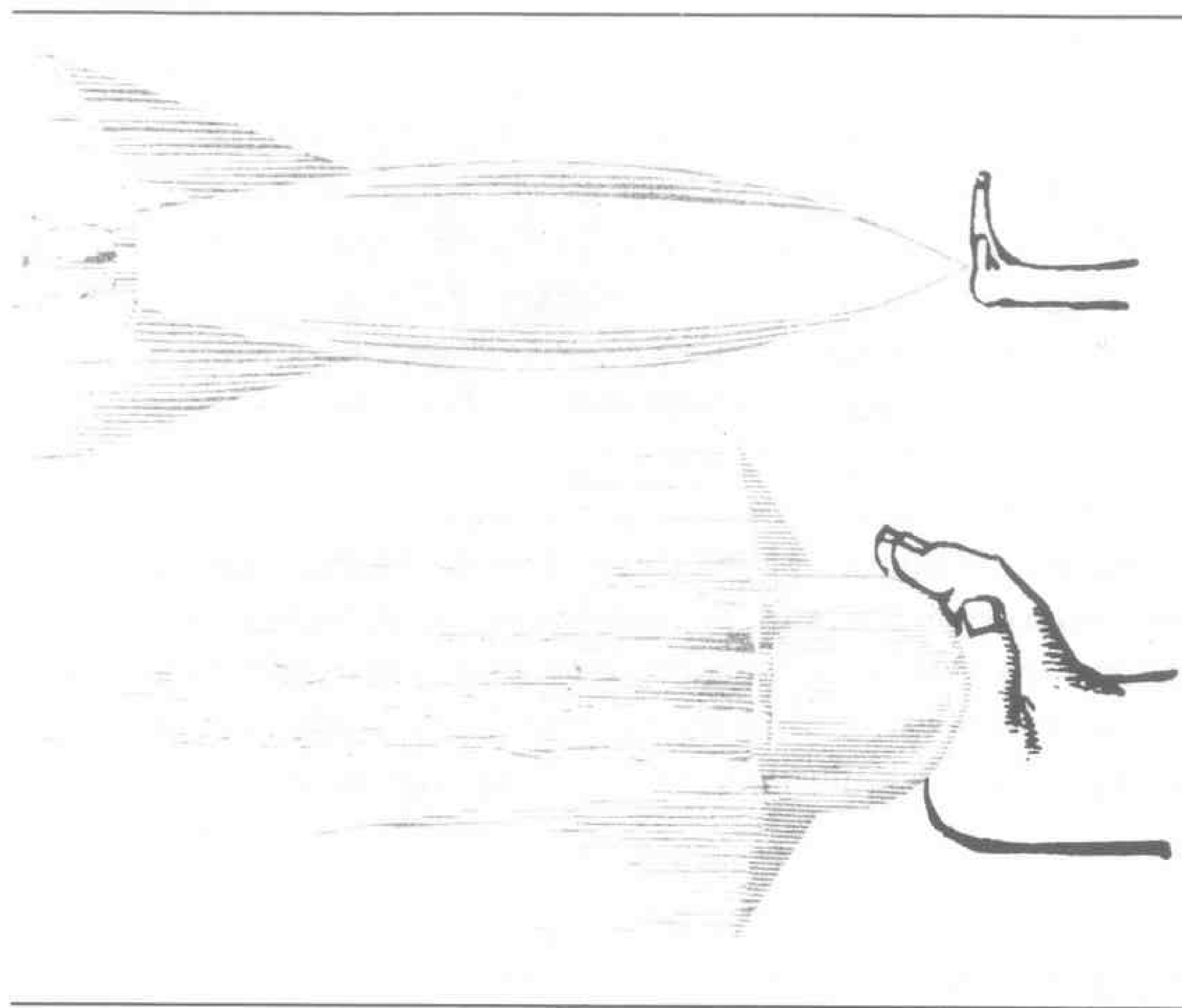
exclusivamente de la masa inercial; cuando usemos la palabra "masa", lo haremos siempre en este sentido.

Estas tres variables —longitud, tiempo, masa— se ven afectadas por el mismo factor de contracción de Lorentz que se dio en el capítulo 2. La longitud de un objeto (en la dimensión paralela al sentido del movimiento) tal como lo ve un observador que se mueve con velocidad v, es menor que la longitud que mide un observador en reposo con respecto al objeto, y se obtiene multiplicando por dicho factor de contracción la longitud medida por el observador en reposo. La masa y la longitud de los intervalos de tiempo varían ambas en proporción inversa, lo cual quiere decir que la masa de un objeto medida por un observador en movimiento con respecto al objeto se obtiene multiplicando la masa en reposo del objeto por el siguiente factor (mayor que la unidad):

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Del mismo modo, un observador en movimiento respecto de un suceso que quiera medir la duración del mismo tendrá que multiplicar por este factor la duración medida por relojes del sistema de referencia inercial fijo al suceso.

Por ejemplo, si la velocidad relativa de dos naves espaciales es aproximadamente de 259.635 kilómetros por segundo, los observadores en cada nave descubrirán que la otra nave se ha encogido a la mitad y que sus relojes van la mitad más despacio. Desde luego, los astronautas encontrarán todo absolutamente normal en el interior de su propia nave. Si los astronautas pudieran alcanzar una velocidad relativa igual a la de la luz, los observadores en cada nave pensarían que la otra se habría contraído hasta una longitud cero, adquiriendo una masa infinita, y descubrirían que el tiempo en la otra nave se habría detenido completamente.



Si la masa inercial no variara de esta forma, entonces la aplicación constante de una fuerza —por ejemplo, la fuerza suministrada por los motores del cohete— podría incrementar constantemente la velocidad de la nave hasta que ésta sobrepasara la velocidad de la luz. Esto no puede ocurrir, ya que a medida que la nave se acelera (desde el punto de vista, digamos, de un observador en la Tierra), su masa relativista aumenta en la misma proporción en que disminuyen su longitud y el tiempo. Cuando la nave se ha contraído hasta una décima parte de su longitud en reposo, su masa relativista se ha hecho diez veces mayor, es decir, está ofreciendo una resistencia diez veces mayor a los motores del cohete. Por tanto, para producir el mismo incremento de velocidad es necesario aplicar una fuerza diez veces mayor que si la nave estuviera

en reposo. La velocidad de la luz nunca puede alcanzarse. Si fuera posible, el observador externo se encontraría con que la nave se habría comprimido hasta una longitud cero, habría adquirido una masa infinita y ejercería una fuerza infinita con sus motores. Los astronautas en el interior de la nave no observarían ningún cambio en ellos mismos, pero descubrirían que el Cosmos se estaba quedando atrás a la velocidad de la luz, que el tiempo cósmico se había detenido y que cada estrella se había aplanado como un disco y había adquirido una masa infinita.

Solamente un escritor de ciencia ficción se atrevería a especular sobre lo que podrían observar los astronautas desde una nave que se moviera a una velocidad mayor que la de la luz. Quizás el Cosmos se volvería del revés, convirtiéndose en su propia imagen especular, las estrellas adquirirían masa negativa y el tiempo cósmico correría hacia atrás. Me apresuro a añadir que nada de esto se deduce de las fórmulas de la teoría especial. Si se sobrepasa la velocidad de la luz, las fórmulas dan unos valores para la longitud, el tiempo y la masa, que son lo que los matemáticos denominan "números imaginarios" (números que están relacionados con la raíz cuadrada de —1). ¿Quién sabe? ¡Quizá una nave que rompiera la barrera de la luz se zambulliría directamente en la tierra de Oz!

Después de aceptar que nada puede ir más deprisa que la luz, los estudiantes de relatividad se quedan a menudo perplejos cuando se encuentran con referencias a velocidades mayores que la de la luz. Para entender exactamente lo que la relatividad tiene que decir sobre este punto será mejor introducir el término "sistema de referencia inercial" (a veces también llamado "sistema galileano" o "laboratorio"). Cuando un objeto como una nave espacial se encuentra en movimiento uniforme, este objeto y todos los objetos que se mueven con él en la misma dirección y a la misma velocidad (por ejemplo, todos los objetos en el interior de la nave) se dice que están

fijos al mismo sistema de referencia inercial. (Hablando más técnicamente, el sistema de referencia inercial es el sistema cartesiano de coordenadas respecto del cual la nave permanece en reposo.) Fuera del contexto de un sistema inercial específico, la teoría especial deja de aplicarse y hay muchas formas de encontrarse con velocidades mayores que la de la luz.

Considérese, por ejemplo, la siguiente situación. Una nave espacial pasa ante nosotros en dirección al este a una velocidad de tres cuartas partes la de la luz. En el mismo instante, otra nave espacial, también viajando a tres cuartas partes de la velocidad de la luz, cruza ante nosotros en dirección al oeste. Desde nuestro sistema de referencia, fijado al sistema de referencia inercial de la Tierra, las dos naves se cruzan con una velocidad relativa de tres mitades la velocidad de la luz. Se acercan a esa velocidad y se separan a esa velocidad. No hay nada en la teoría de la relatividad que lo prohíba. Sin embargo, lo que la teoría especial afirma es que *si estuviéramos en una de las naves* y midiéramos la velocidad relativa entre las mismas, obtendríamos un valor menor que el de la velocidad de la luz.

En este libro hacemos todo lo posible para soslayar las matemáticas de la relatividad, pero al igual que en el caso de la fórmula de la contracción de Lorentz, la fórmula que damos ahora es tan sencilla que vale la pena introducirla. Si x es la velocidad de una nave relativa a la Tierra e y es la velocidad de la otra nave relativa a la Tierra, entonces la velocidad relativa entre las naves, *vista desde la Tierra,* es, por descontado, $x + y$. Pero vista por un observador situado en una de las naves, tenemos que sumar las dos velocidades de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\frac{x+y}{1+\frac{xy}{c^2}}.$$



En esta fórmula, c es la velocidad de la luz. Es fácil ver que cuando las velocidades de las naves son pequeñas comparadas con la de la luz, la fórmula da un resultado que es casi el mismo que se obtendría sumando las dos velocidades a la manera clásica. Sin embargo, si las velocidades de las naves son muy grandes, la fórmula da un resultado bastante distinto. Considérese el caso límite y supóngase que en lugar de dos naves se trata de dos rayos de luz que se cruzan. El observador en la Tierra ve que se separan con una velocidad de $2c$, o dos veces la velocidad de la luz. Pero si cabalgara sobre uno de los dos rayos calcularía la velocidad de acuerdo con la fórmula del siguiente modo:

$$\frac{c + c}{1 + \frac{c^2}{c^2}},$$

lo cual, desde luego, se reduce al valor de c. En otras palabras, vería al otro rayo alejarse de él a la velocidad de la luz.

Supóngase que un rayo de luz pasa ante nosotros al mismo tiempo que cruza una nave espacial en la dirección opuesta a velocidad x. Desde el sistema de referencia inercial de la Tierra, el rayo de luz y la nave se cruzan a una velocidad de c más x. Usando la fórmula, el lector puede entretenerse en calcular la velocidad de la luz observada desde el sistema inercial de la nave. Por descontado que, de nuevo, vuelve a salir c.

Fuera del dominio de la teoría de la relatividad especial, que trata solamente con sistemas inerciales, todavía es posible hablar de la velocidad de la luz como un límite absoluto. Pero ahora hay que matizarlo del siguiente modo: no existe ningún medio de enviar una *señal* desde un cuerpo material a otro a una velocidad mayor que la de la luz. "Señal" se emplea aquí en un sentido lato que incluya cualquier tipo de cadena causa-efecto por medio de la cual pueda transmitirse

un mensaje: el envío de un objeto físico, por ejemplo, o la transmisión de cualquier tipo de energía como una onda sonora, una onda electromagnética, una onda de presión en un sólido, etc. No se puede enviar un mensaje a Marte con una velocidad mayor que la de la luz. No se puede lograr, por ejemplo, escribiendo una carta y mandándola en un cohete, puesto que, como hemos visto, la velocidad relativa del cohete siempre deber ser menor que la velocidad de la luz. Si el mensaje se codifica y se emite por radio o por radar, viaja *a* la velocidad de la luz. Ningún otro tipo de energía puede proporcionar un medio más rápido de transmisión.

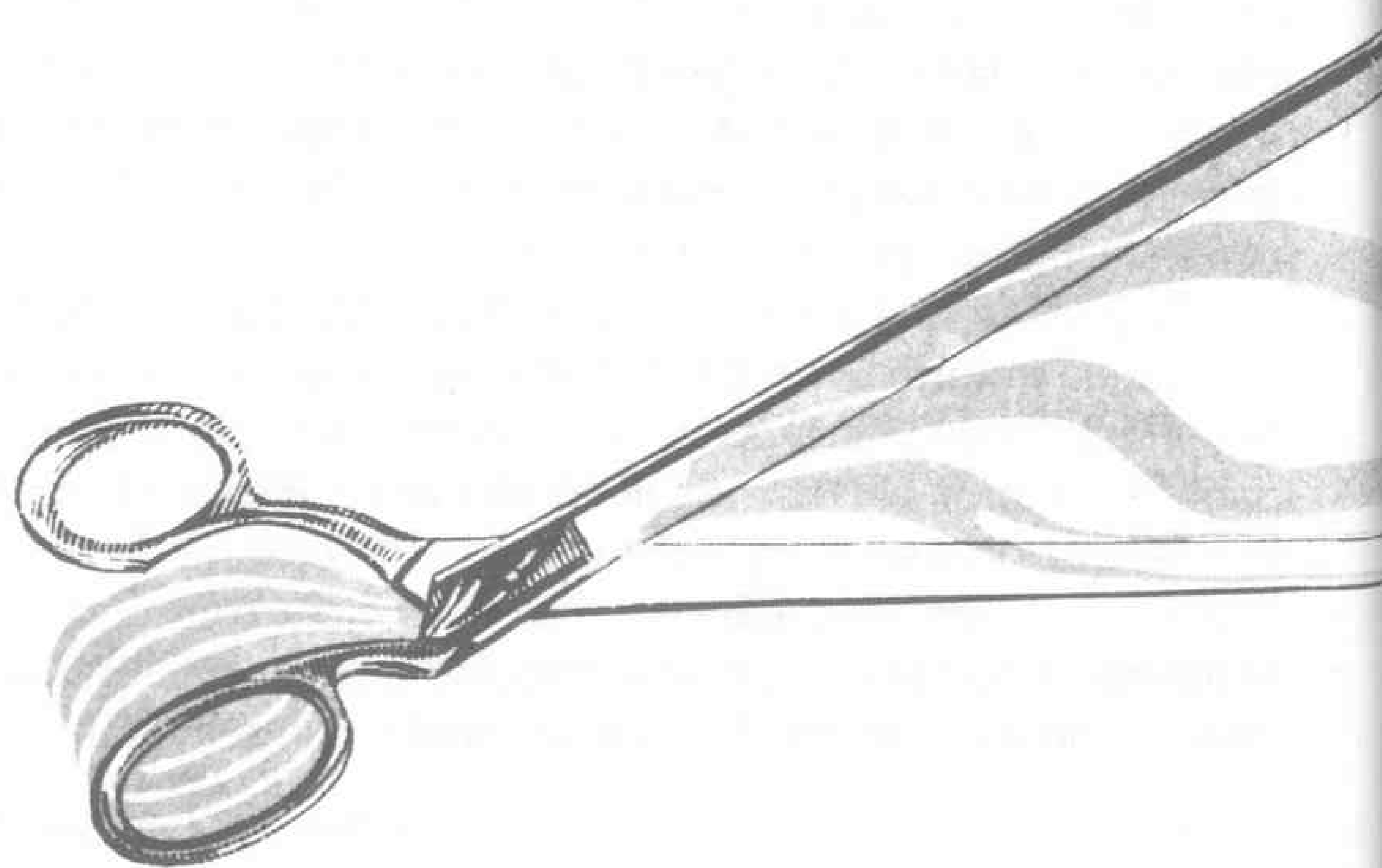
Aunque no puedan enviarse señales más veloces que la luz, es posible observar ciertos tipos de movimiento que, con respecto al observador, tendrán una velocidad mayor que la de la luz*. Imaginenos unas tijeras gigantescas, de hojas tan largas que llegaran al planeta Neptuno. Al cerrarse las hojas de las tijeras a velocidad constante, el punto donde éstas se cruzan se va alejando hacia los extremos de las hojas a una velocidad cada vez mayor. Imaginemos que estamos sentados sobre el eje que une las hojas. Con respecto a nuestro sistema de referencia, el punto de intersección de las hojas pronto se alejará de nosotros a una velocidad mayor que la de la luz. Desde luego, lo que se está alejando no es un punto material, sino un punto geométrico.

Es posible que se le ocurra la siguiente idea: Supongamos que la empuñadura de las tijeras se encuentra en la Tierra y el punto de intersección de las hojas en el planeta Neptuno. Si abrimos y cerramos ligeramente las tijeras, el punto de intersección oscilará. ¿No podríamos de este modo transmitir señales casi instantáneamente al planeta Neptuno? La respuesta es negativa, ya que el impulso que mueve las hojas debe transmitirse de molécula a molécula, y esta transmisión

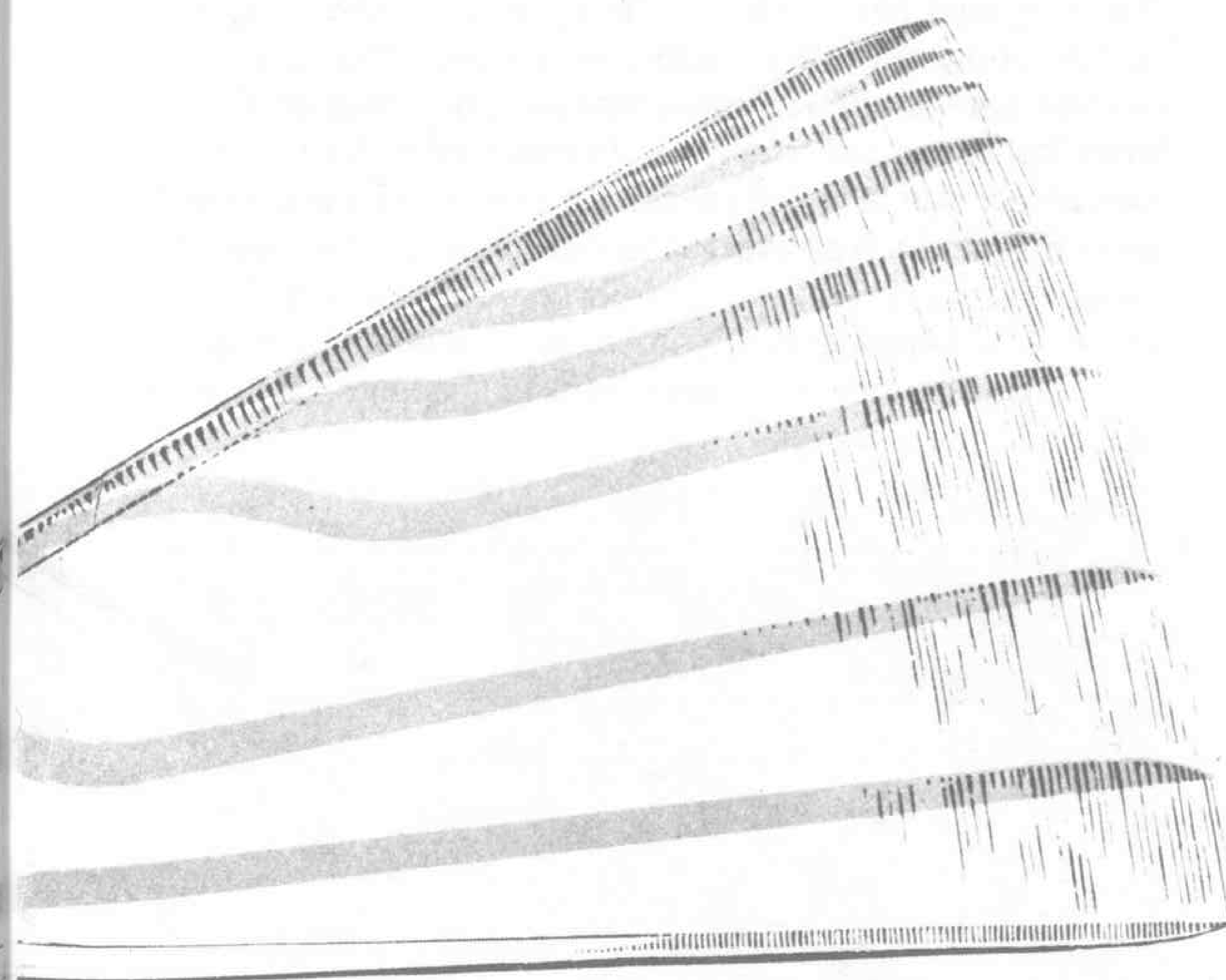
* Véase el artículo de Milton A. Rothman, "Things That Go Faster Than Light", *Scientific American* (julio, 1960).

debe ser siempre más lenta que la de la luz. No hay cuerpos absolutamente rígidos en relatividad. De otro modo, sería posible enviar un mensaje desde la Tierra a Neptuno extendiendo simplemente una vara y haciendo oscilar un extremo. No hay modo de usar las tijeras gigantes ni cualquier otro tipo de objetos llamados rígidos para transmitir una señal más deprisa que la luz.

Si el haz de luz generado por un foco se dirige a una pantalla suficientemente grande y lejana, se puede hacer girar el foco de modo que el punto luminoso de la pantalla se mueva más deprisa que la luz. De nuevo, aquí, no es ningún objeto material el que se mueve, sino que se trata simplemente de una ilusión. Si el foco se dirige hacia el espacio y se hace girar, las partes más lejanas del haz luminoso barrerán el espacio a una velocidad mucho mayor que la de la luz. En los osciloscopios, el haz de electrones “dibuja” sobre la pantalla fosforescente una curva a una velocidad mayor que la de la luz; pero es la forma geométrica la que se mueve en la pantalla a esa velocidad y no los electrones materiales.



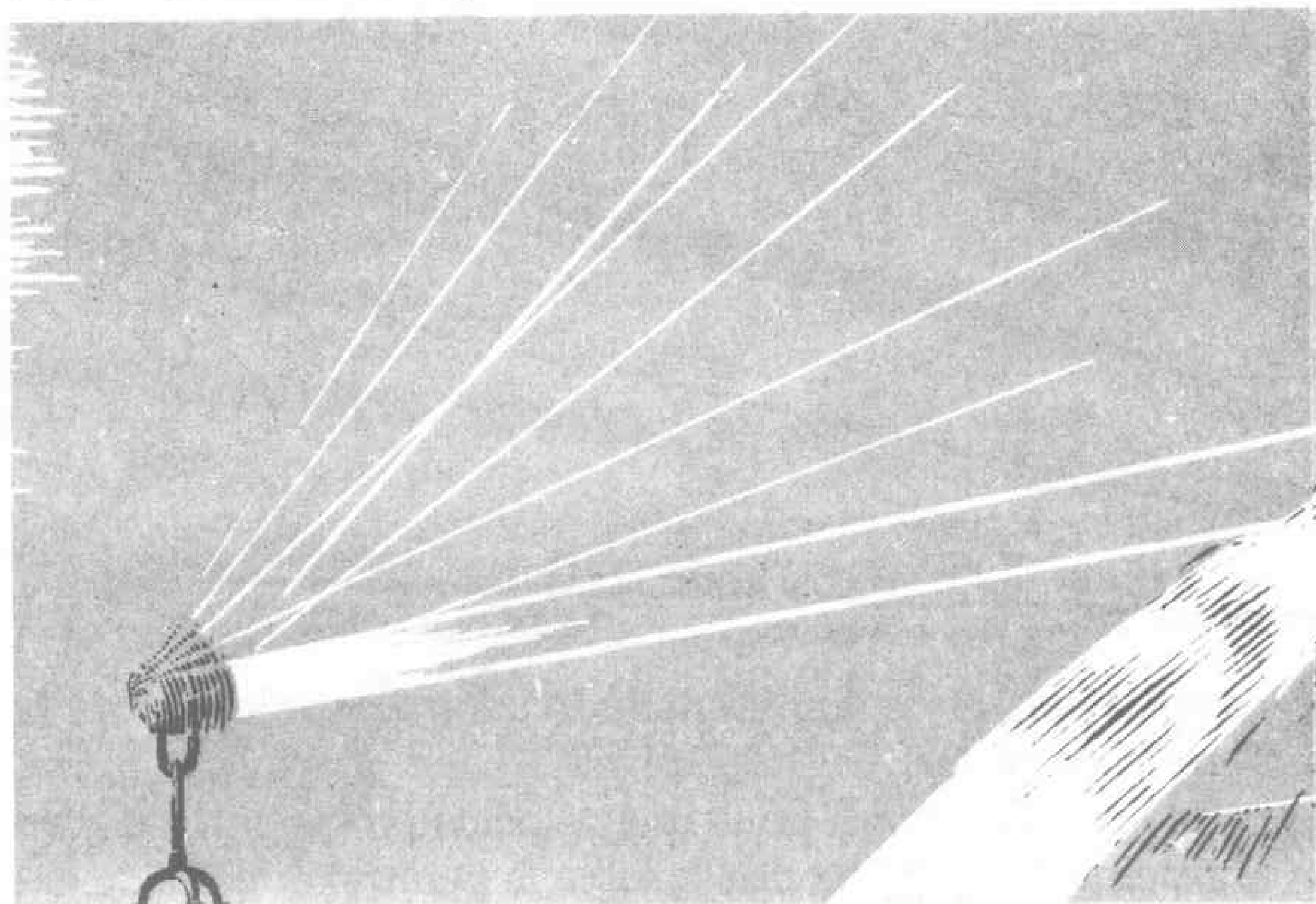
En el capítulo 5 mostraremos que es lícito suponer que la Tierra es un sistema de referencia que no gira. Desde este punto de vista, la velocidad circular de las estrellas alrededor de la Tierra es mucho mayor que la velocidad de la luz. Una estrella que se encuentre tan sólo a diez años luz tiene una velocidad relativa respecto de la Tierra de veinte mil veces la velocidad de la luz. Pero no hay necesidad de mirar a las



estrellas para encontrar un método geométrico de romper la barrera de la luz. Cuando un niño hace girar una peonza, puede comunicar a la Luna una velocidad rotacional (relativa al sistema de coordenadas ligado a la peonza) que puede ex-

ceder en mucho la velocidad de la luz. En el capítulo 12 se explica que, de acuerdo con una determinada teoría sobre el Universo, las galaxias distantes se alejan de nosotros a una velocidad mayor que la de la luz. Ninguno de estos ejemplos contradice la afirmación de que la velocidad de la luz es la velocidad máxima a la que se pueden enviar señales desde un cuerpo material a otro.

Una consecuencia importante de la teoría de la relatividad, que aquí sólo podemos tratar brevemente, es que, en ciertas condiciones, la energía puede convertirse en masa, y, en otras condiciones, la masa puede convertirse en energía. Antes los físicos pensaban que la masa total del Cosmos es constante y que la cantidad total de energía es también siempre la misma. Esto se expresaba por medio de las leyes de la "conservación de la masa" y de la "conservación de la energía". Con la introducción de la teoría de la relatividad, las dos leyes se han fusionado en una única ley, la ley de la "conservación de masa-energía".

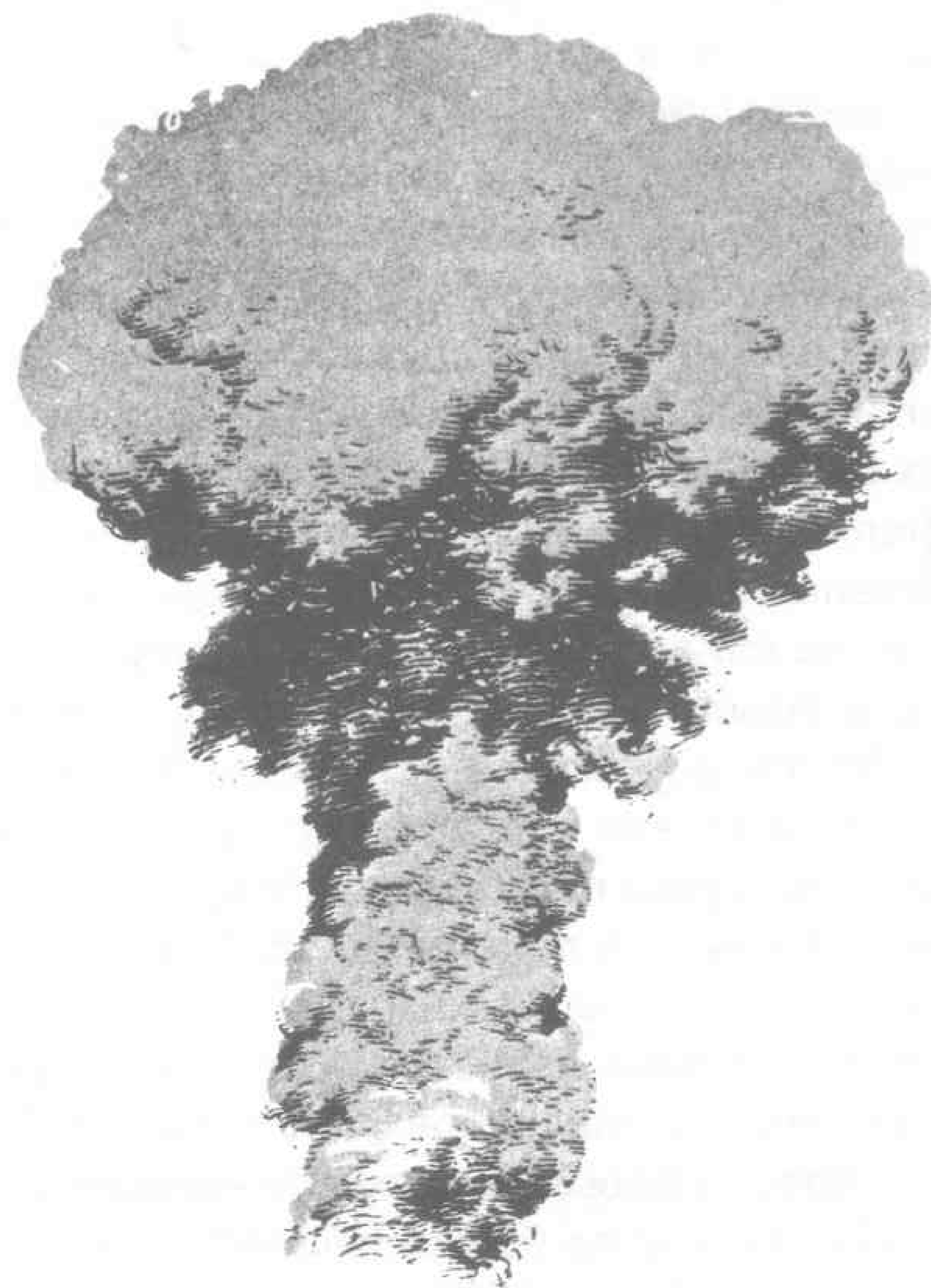


Cuando los motores de un cohete aceleran la nave, parte de la energía se destina a incrementar la masa relativista de la misma. Cuando se suministra energía a una cafetera calentándola, es decir, aumentando la velocidad de sus moléculas, la cafetera, de hecho, pesa una insignificancia más que lo que pesaba antes. A medida que el café se enfría, la masa se pierde. Al dar cuerda a un reloj se le da energía, y el reloj gana realmente una diminuta porción de masa. Cuando está funcionando pierde masa. Tales ganancias y pérdidas de masa son tan insignificantes que nunca se habrían considerado en los cálculos ordinarios de la física. Sin embargo, la equivalencia entre masa y energía no es en absoluto despreciable cuando una bomba atómica hace explosión.

La explosión de la bomba es la conversión súbita en energía de parte de su masa. La energía radiada por el Sol tiene un origen similar. La enorme masa gravitatoria del Sol hace que el gas de hidrógeno en su interior se vea sometido a presiones tan descomunales que la temperatura del gas aumenta hasta hacer posible la fusión del hidrógeno, es decir, su conversión en helio. En este proceso, una parte de la masa se convierte en energía. La ecuación que expresa la relación entre la masa y la energía es, como casi todo el mundo sabe en la actualidad:

$$e = mc^2,$$

donde e es la energía, m es la masa y c^2 es el cuadrado de la velocidad de la luz. Esta ecuación fue formulada por Einstein a propósito de su teoría de la relatividad. Esta fórmula nos indica que un pedazo pequeñísimo de masa es capaz de liberar una monstruosa cantidad de energía. La vida en la Tierra no existiría sin la energía que nos llega del Sol, así que en este sentido la vida depende de esta fórmula. Desgraciadamente, parece como si el fin de la vida en la Tierra estuviera también ligado a la misma. No es ninguna exageración afirmar que el



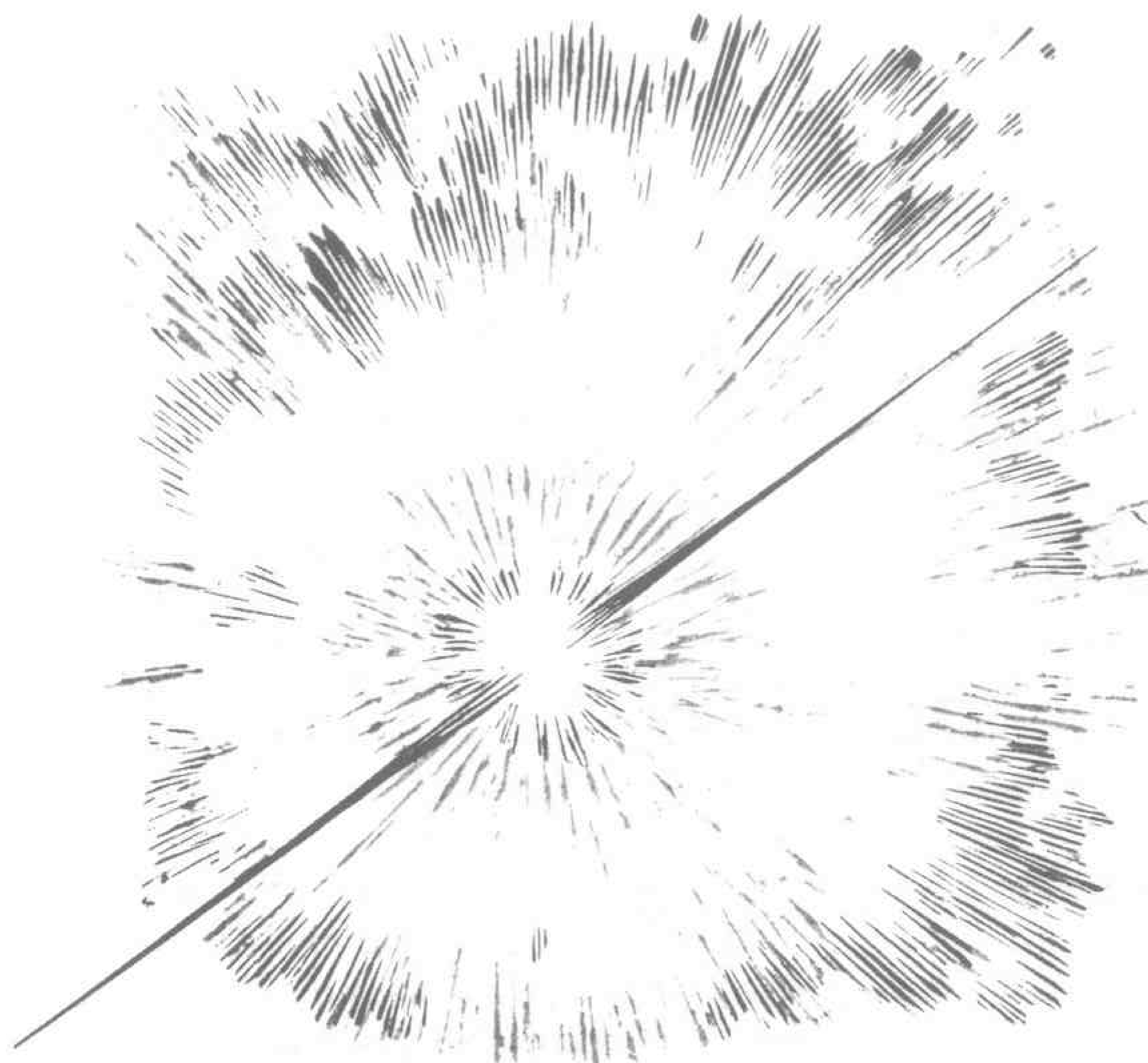
mayor problema que se ha planteado la humanidad es aprender a convivir con el terrible hecho que se expresa con esta sencilla ecuación.

La bomba atómica, sin embargo, no es más que una de las muchas confirmaciones de la teoría especial. Se empezaron a acumular datos experimentales a su favor casi cuando aún se secaba la tinta del artículo de Einstein de 1905. Ésta es, de hecho, una de las teorías mejor confirmadas de la física moderna. Se configura diariamente en los laboratorios de los científicos atómicos que trabajan con partículas que viajan a

velocidades próximas a las de la luz. Cuanto más rápidas son estas partículas, mayor es la fuerza que se necesita para acelerarlas; en otras palabras, mayor es su masa relativista. Ésta es precisamente la razón de que los físicos sigan construyendo aceleradores de partículas cada vez más grandes. Necesitan campos cada vez mayores para acelerar las partículas cuyas masas aumentan desmesuradamente cuando sus velocidades se acercan a la de la luz. En la actualidad se pueden acelerar electrones hasta 0,999999999 veces la velocidad de la luz. Esto proporciona a cada electrón una masa (relativa al sistema de referencia inercial de la Tierra) que es cerca de cuarenta mil veces su masa en reposo. Los cambios relativistas del tiempo son asimismo observables. Por ejemplo, la vida media de un mesón que se mueve a gran velocidad es mayor que la de uno que se mueve lentamente, debido a que el tiempo propio del mesón pasa más despacio (respecto a nosotros) a medida que se mueve a mayor velocidad.

Cuando una partícula choca con su antipartícula (una partícula con la misma estructura, pero de carga eléctrica opuesta), se produce una aniquilación mutua total. La masa entera de ambas partículas se convierte en energía radiante. Hasta la fecha, esto se ha venido haciendo en el laboratorio únicamente con partículas individuales de vida corta. Si los físicos consiguen construir antimateria (materia hecha de antipartículas), habrán alcanzado el punto culminante en lo que se refiere a la energía atómica. Una diminuta cantidad de antimateria en una nave espacial, mantenida en suspensión mediante campos magnéticos, podría combinarse con materia de modo controlado a fin de proporcionar el combustible suficiente para propulsar la nave hasta las estrellas.

En definitiva, la teoría de la relatividad especial ha sido confirmada de manera tan absoluta por los experimentos que sería difícil encontrar hoy día un solo físico que pusiera en duda su validez.

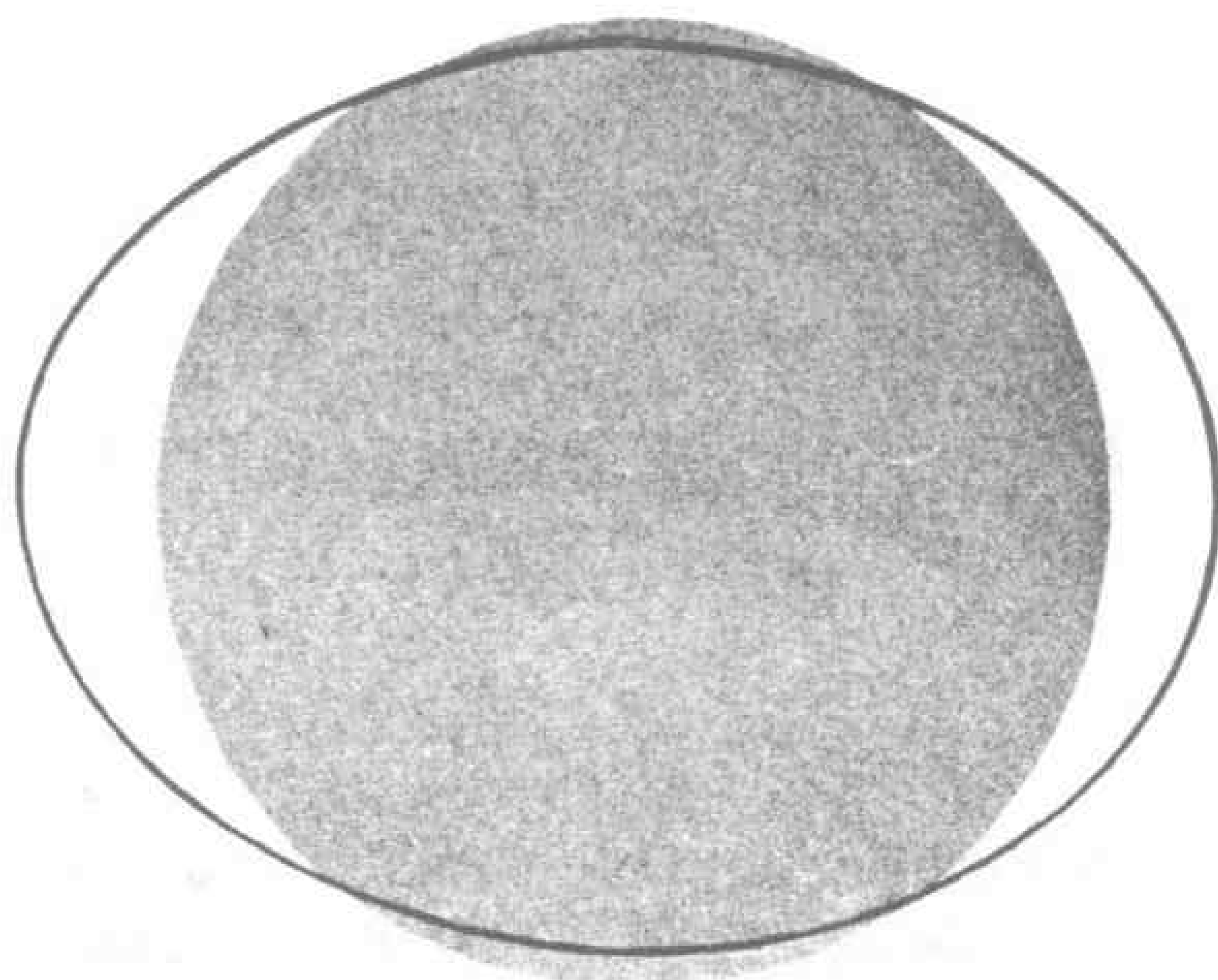


El movimiento *uniforme*, por tanto, es relativo. Sin embargo, antes de pasar a generalizar y decir que *todo* movimiento es relativo, es necesario salvar una dificultad definitiva: el obstáculo de la inercia. En qué consiste exactamente este obstáculo y cómo llegó Einstein a superarlo constituyen el tema del siguiente capítulo.

V. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL

En el comienzo del segundo capítulo se señaló que existen dos modos de detectar el movimiento absoluto: midiendo el movimiento respecto de un rayo de luz o haciendo uso de los efectos inerciales que aparecen cuando se acelera un objeto. El experimento de Michelson-Morley demostró que el primer método era inviable. La teoría de la relatividad especial explicó la causa. Este capítulo se ocupa del segundo método: el empleo de efectos inerciales como medio de determinar el movimiento absoluto.

Cuando un cohete espacial despega, los astronautas en su interior se sienten empujados contra el respaldo de su asiento con una enorme fuerza. Éste es un efecto inercial común ocasionado por la aceleración del cohete. ¿No indica esto que es el cohete el que se mueve? Si se sostiene que todo movimiento es relativo, incluso el movimiento acelerado, debe ser posible elegir el cohete como sistema de referencia fijo. En tal caso, deberá considerarse que la Tierra y el Cosmos entero se mueven hacia atrás, alejándose del cohete. Pero entonces, ¿cómo se explican las fuerzas inerciales que actúan sobre el astronauta? La fuerza que lo mantiene apretado contra el respaldo de su asiento parece indicar sin ningún género de dudas que es el cohete y no el Cosmos lo que se mueve.

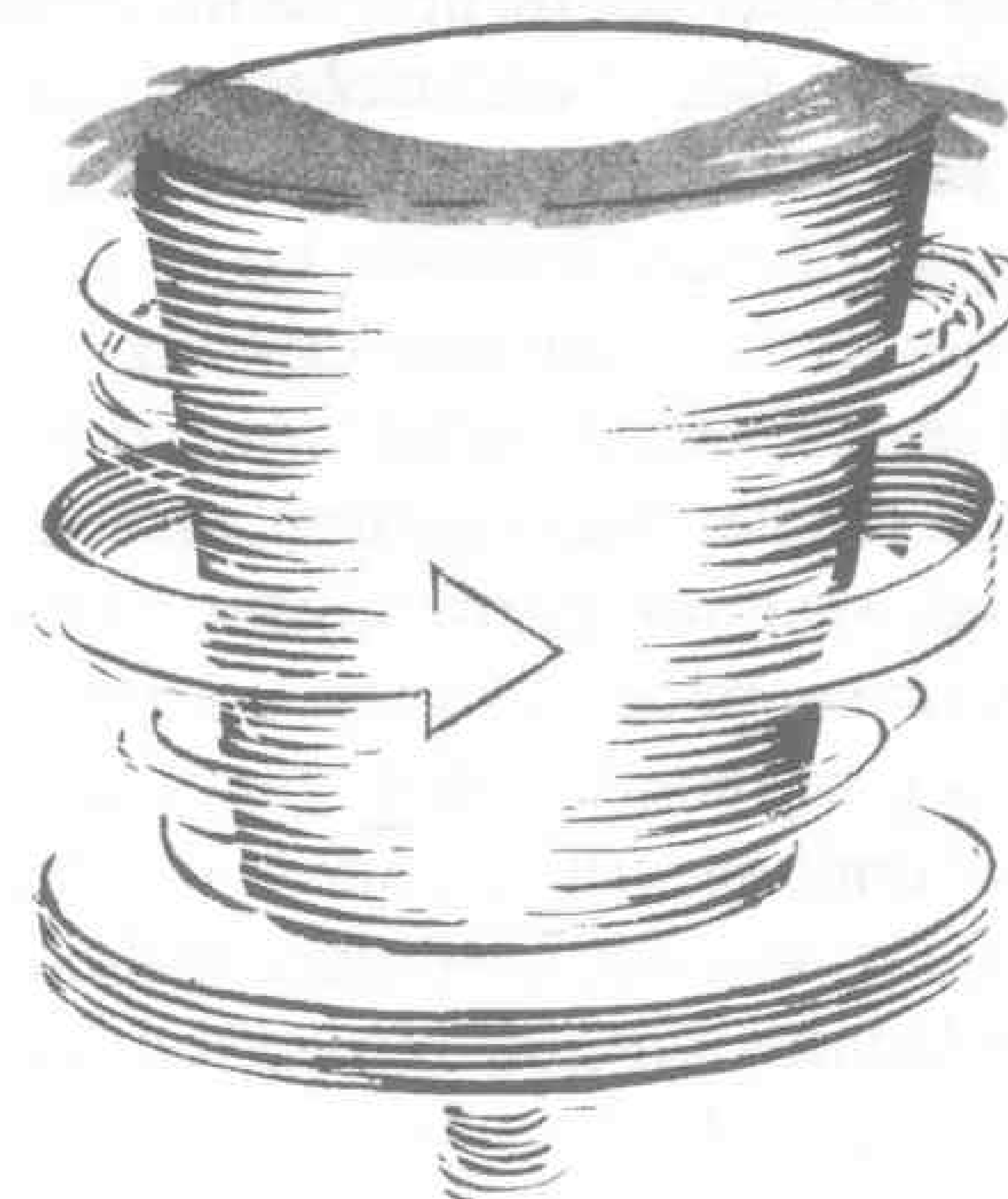


Otro ejemplo conveniente lo proporciona la Tierra en rotación. La fuerza centrífuga, efecto inercial que acompaña la rotación, hace que la Tierra sea ligeramente más abultada en el ecuador. Si todo movimiento es relativo, ¿no sería posible entonces elegir a la Tierra como sistema de referencia fijo, siendo el Cosmos el que girara a su alrededor? Ciertamente, cabe imaginarlo; pero entonces, ¿qué es lo que ocasiona el achatamiento de la Tierra en los polos? Este achatamiento parece indicar que es la Tierra la que gira y no el Universo. Por cierto, los astrónomos no están de acuerdo en si es la fuerza centrífuga la que sigue manteniendo la protuberancia ecuatorial o bien si esta protuberancia se produjo en épocas anteriores, cuando la Tierra era más elástica, y se ha convertido ahora en un rasgo de una Tierra rígida, rasgo que se seguiría manteniendo aun en el caso de que la Tierra dejara de girar. Todos los astrónomos admiten, sin embargo, que la fuerza centrífuga es la causa del abultamiento.

Por razones de este tipo, Newton se convenció de que el movimiento *no* era relativo. Como prueba aportó el hecho de

que si un cubo de agua se hace girar alrededor de su eje vertical, la fuerza centrífuga hace que la superficie libre del agua adopte una forma cóncava o que incluso se derrame fuera del cubo. Es inimaginable que un Universo en rotación pueda producir tal efecto sobre el agua; por tanto, según Newton, debemos concluir que la rotación del cubo es absoluta.

Durante los diez años posteriores a la publicación de su teoría especial, Einstein estuvo analizando este problema. La mayoría de los físicos no lo veían como un problema. ¿Por qué no aceptamos el hecho, decían, de que el movimiento uniforme es relativo (como afirma la teoría especial), pero el movimiento acelerado, en cambio, es absoluto? Einstein no estaba satisfecho con este estado de cosas. Tenía el presentimiento de que si el movimiento uniforme es relativo, el movimiento acelerado también tiene que serlo. Finalmente, en 1916, once años después de la publicación de su teoría especial, publicó su teoría de la relatividad general. La teoría se



denomina "general" porque es una generalización o extensión de la teoría especial. Incluye a la teoría especial como caso particular.

La teoría general constituye un logro intelectual mucho más grande que la teoría especial. Si Einstein no hubiera concebido la teoría especial, no cabe duda de que pronto, de una u otra forma, otros físicos la hubieran formulado. Poincaré, el matemático francés mencionado anteriormente, fue uno entre los diversos científicos que estuvieron a las puertas de su descubrimiento. En una notable conferencia que dio en 1904*, Poincaré predijo la aparición de una "mecánica completamente nueva" en la que ninguna velocidad podría exceder la velocidad de la luz, del mismo modo que ninguna temperatura puede descender por debajo del cero absoluto. Esta mecánica debería respetar, dijo, «el principio de relatividad, de acuerdo con el cual las leyes de la física deben ser las mismas tanto para un observador fijo como para un observador transportado en un movimiento uniforme de traslación; de modo que no tenemos ningún medio de distinguir si estamos o no transportados por tal tipo de movimiento». Poincaré no se percató de los pasos esenciales que debían darse para desarrollar tal programa, pero intuyó la esencia de la teoría especial. En aquel tiempo, Einstein no sabía cuán cerca estaban sus ideas de las de Poincaré, Lorentz y otros. Años después tributaría un generoso homenaje a estos hombres.

La teoría de la relatividad general es algo totalmente distinto. Constituyó, si se me permite usar de nuevo la frase de Teller, un «bello suceso inesperado»: un trabajo de tan magnífica originalidad y siguiendo líneas tan poco ortodoxas, que irrumpió en el mundo científico con un efecto parecido al que tuvo el nuevo baile, el *twist,* cuando invadió las salas de baile de los Estados Unidos en 1962. Einstein había dado nueva

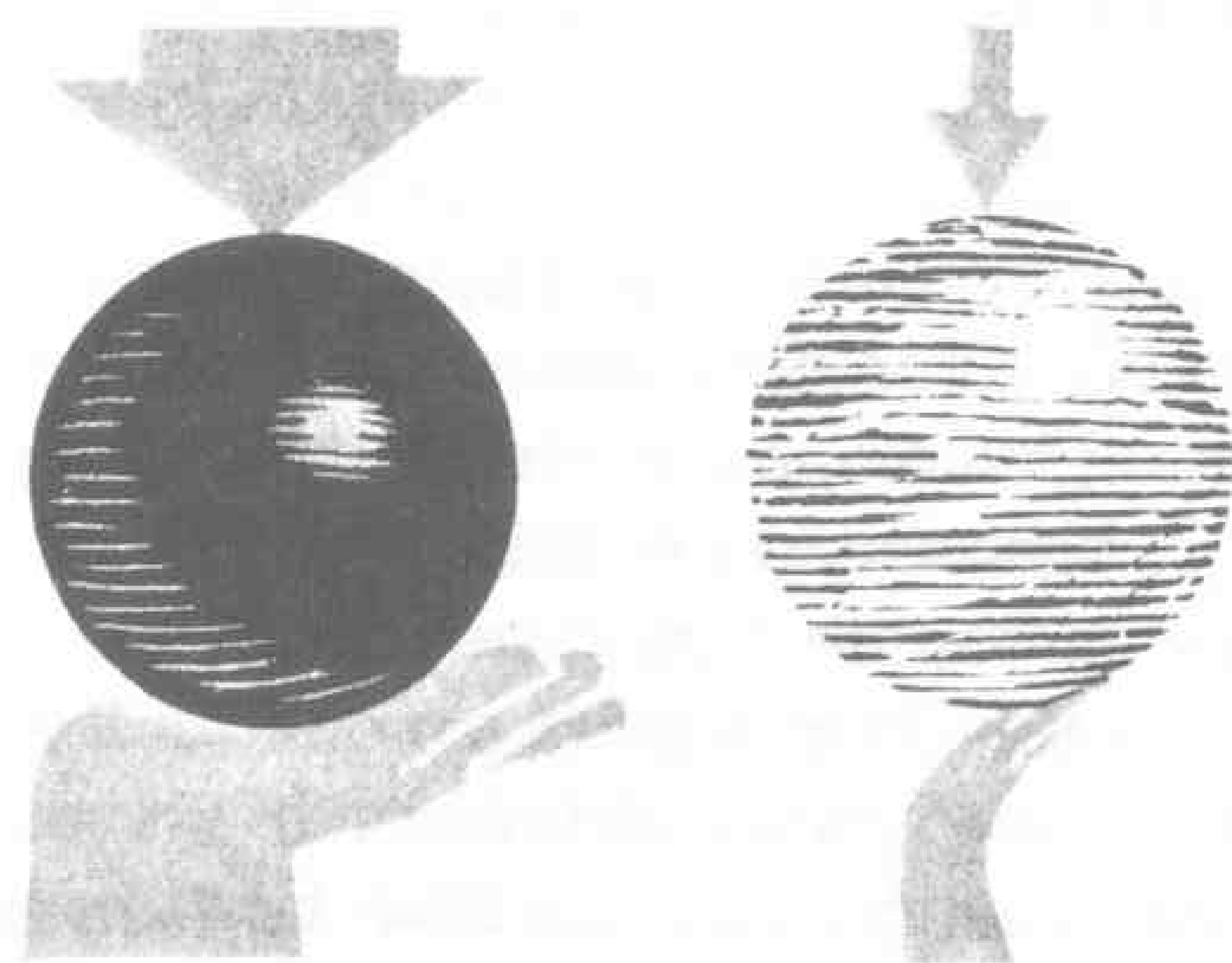
* Esta conferencia fue reproducida en *Scientific Monthly* (abril, 1956).

forma a los antiguos ritmos de danza del tiempo y del espacio. En un tiempo sorprendentemente corto todos los físicos del mundo se encontraron bailando el nuevo *twist,* expresando su más consternado horror ante el mismo, o lamentándose de ser demasiado viejos para aprenderlo. Sin embargo, de no haber nacido Einstein, no existe ninguna duda de que otros científicos hubieran dado el mismo giro a la física, aunque probablemente con un retraso de más de un siglo. Son muy pocas las grandes teorías en la historia de la ciencia que se deben tan completamente al trabajo de un solo hombre.

«Newton, perdóname», escribió Einstein hacia el fin de sus días. «Tú encontraste el único camino que, en tu época, era todavía posible para un hombre de la máxima capacidad intelectual y creativa.» Estas palabras son todo un emotivo tributo del más grande científico de nuestro tiempo a su más grande predecesor.

En el corazón de la teoría de la relatividad general se encuentra lo que se llama el principio de equivalencia. Éste no es más que la asombrosa afirmación (Newton la hubiera considerado una locura) de que la gravedad y la inercia son lo mismo. No es que tengan simplemente efectos similares. *Gravedad e inercia son dos palabras distintas que designan exactamente lo mismo.*

Einstein no fue el primer científico que quedó impresionado por el extraño parecido entre los efectos gravitatorios e inerciales. Considérese por un momento lo que sucede cuando se dejan caer una bala de cañón y una pequeña bola de madera desde la misma altura. Supongamos, para concretar, que la bala de cañón pesa cien veces más que la bola de madera. Esto quiere decir que la gravedad ejerce sobre la bala una fuerza cien veces mayor que la que ejerce sobre la bola de madera. Es fácil comprender por qué los enemigos de Galileo no podían creer que las dos llegaran al suelo al mismo tiempo. Pero hoy todos sabemos que, ignorando la influencia



de la resistencia del aire, las dos caen una junta a la otra. Para explicar este hecho, Newton tuvo que hacer una suposición harto curiosa: al mismo tiempo que la gravedad tira de la bala de cañón, la inercia de la bala, es decir, la *resistencia* que ejerce contra la fuerza, la retiene. Es cierto que la fuerza que ejerce la gravedad es cien veces mayor sobre la bala de cañón que sobre la bola de madera, pero la inercia que retiene la bala de cañón es también exactamente cien veces mayor.

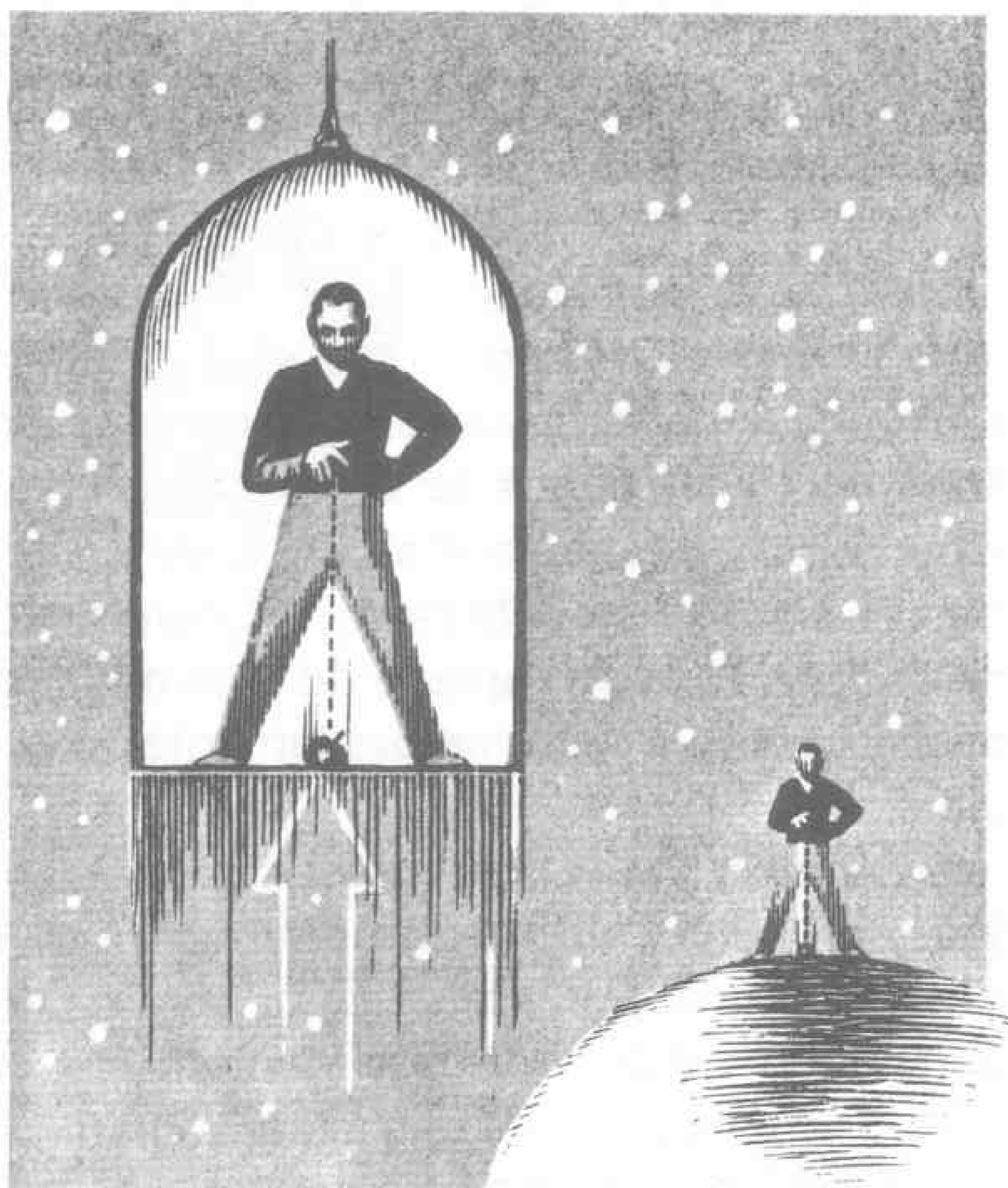
Los físicos expresan este hecho del siguiente modo: la fuerza de la gravedad que actúa sobre un objeto es siempre proporcional a la inercia del objeto. Si el objeto A es dos veces más pesado que el objeto B, su inercia es también dos veces mayor. Se necesitará una fuerza dos veces mayor para acelerar el objeto A a una cierta velocidad que la necesaria para acelerar el objeto B a la misma velocidad. Si esto no fuera así, objetos de distinto peso caerían con distintas aceleraciones.

Es fácil imaginar un mundo en el que las dos fuerzas no sean proporcionales. De hecho, los científicos concibieron un mundo así desde Aristóteles hasta Galileo. Podríamos vivir perfectamente en un mundo de este tipo. Las condiciones no

serían exactamente las mismas dentro de un ascensor que cayera en caída libre, pero, ¿cuántas veces nos subimos a un ascensor que esté cayendo en caída libre? De todos modos, vivimos en un mundo en el que las dos fuerzas son proporcionales. Galileo fue el primero en demostrarlo. Alrededor de 1900 un físico húngaro, el barón Roland von Eötvös, llevó a cabo una serie de experimentos sorprendentemente precisos que confirmaban los hallazgos de Galileo. Los experimentos de mayor precisión los realizaron a principios de los años sesenta Robert H. Dicke y sus colegas de la Universidad de Princeton*. Hasta donde fueron capaces de determinarlo, la masa gravitacional (el peso) es siempre exactamente proporcional a la masa inercial.

Newton conocía perfectamente el curioso vínculo entre la gravedad y la inercia, un vínculo que hace que todos los objetos caigan con la misma aceleración, pero no tenía absolutamente ninguna explicación que pudiera dar cuenta de ello. Se trataba simplemente de una extraordinaria coincidencia. Gracias a esta coincidencia es posible hacer uso de la inercia para crear o eliminar campos gravitatorios. En el capítulo 1 se comentó la posibilidad de producir un campo gravitatorio artificial en una nave espacial en forma de toro (cámara de neumático) simplemente haciendo girar la nave como una gran rueda. La fuerza centrífuga hará que los cuerpos en el interior de la nave se precipiten contra el borde exterior. Haciendo girar la nave a una determinada velocidad constante, se crea un campo de fuerzas inercial en su interior que tiene el mismo efecto que el campo gravitatorio de la Tierra. Los astronautas podrían andar sobre lo que les parecería un suelo curvo. Los objetos que se soltaran en el interior de la nave caerían sobre el suelo. El humo ascendería hacia el techo. Todos los efectos de un campo gravitatorio corriente

* Véase R. H. Dicke, "The Eötvös experiment", *Scientific American* (diciembre, 1961).



estarían presentes. Einstein ilustró este punto con el siguiente experimento ideal.

Imaginemos un ascensor transportado a través del espacio con un movimiento uniformemente acelerado. Si esta aceleración uniforme es exactamente la misma que la aceleración con que un objeto cae sobre la Tierra, entonces las personas en el interior del ascensor creerán que se encuentran en un campo gravitatorio exactamente igual al de la Tierra.

La aceleración no solamente puede simular la gravedad, sino que también puede contrarrestarla. En un ascensor en caída libre, por ejemplo, la aceleración hacia abajo elimina completamente los efectos de la gravedad. En el interior de una nave prevalece un estado de gravedad cero en tanto ésta se encuentre en caída libre: moviéndose libremente sin estar



bajo la influencia de ninguna fuerza excepto la gravedad. El estado de ingravidez experimentado por los astronautas rusos y estadounidenses en sus viajes alrededor de la Tierra se explica por el hecho de que sus naves se encuentran en un estado de caída libre. En tanto los motores de una nave espacial no estén en marcha, la gravedad es nula en su interior.

Esta correspondencia notable entre la inercia y la gravedad no recibió explicación hasta que Einstein desarrolló su teoría de la relatividad general. Como ya lo hiciera en su teoría especial, invocó la hipótesis más sencilla y a la vez más osada. En la teoría especial, recordémoslo, Einstein dijo que la razón de que parezca que no hay viento de éter es, simplemente, que *no hay* viento de éter. En la teoría general dice: la razón de que gravedad e inercia parezcan ser lo mismo es que *son* lo mismo.

No es exactamente correcto decir que en el interior de un ascensor en caída libre se simula una condición de gravedad cero. Para un observador en la Tierra el campo gravitacional terrestre sigue estando allí, causando la caída tanto del ascensor como de la persona en su interior. Pero para el observador situado dentro del ascensor, que considera el ascensor como su marco de referencia, la Tierra y el Universo entero están acelerándose hacia él. Esto crea un campo gravitatorio (como veremos a continuación) que anula el campo que rodea la Tierra. Las ecuaciones de campo son tales que cuando la situación total es la descrita por el observador en el ascensor, el campo gravitatorio desaparece. Se trata de una verdadera gravedad cero.

De manera similar, no es exactamente correcto decir que el campo gravitatorio creado en una nave espacial en rotación o en un ascensor acelerado hacia arriba sea simulado. No se trata de una simulación. La gravedad se crea genuinamente. Un campo gravitatorio producido de esta manera no tiene la misma estructura geométrica que el que rodea un cuerpo de gran tamaño como la Tierra, pero no obstante se trata de un verdadero campo gravitatorio. Al igual que en el caso de la teoría especial, la descripción matemática de la naturaleza se hace más complicada a fin de permitir este tipo de asombrosas afirmaciones, pero el resultado final justifica la complejidad. En lugar de dos fuerzas, gravedad e inercia, existe únicamente una sola.

Einstein odiaba la complejidad y amaba la sencillez, tanto en su vida diaria como en su pensamiento. En una ocasión, cuando un amigo le preguntó por qué se negaba a comprar jabón de afeitar (se afeitaba con jabón ordinario), Einstein respondió que le parecía intolerable tener dos clases de jabón cuando con una bastaba. Antes de que Einstein apareciera con su navaja de Occam (principio según el cual la mejor explicación es la que contiene las ideas más sencillas y el menor número de hipótesis), los científicos afeitaban el Universo con dos clases de jabón, gravedad e inercia. ¿Hubiera llegado Einstein a su teoría general de no haber mediado esa intolerancia?

Puede parecer extraño el empleo de la palabra "sencillez" al hablar de una teoría que emplea unas matemáticas tan avanzadas que llegó a decirse en una ocasión que no había más de doce hombres en el mundo capaces de entenderla (una exageración, por cierto, incluso en la época en que se hizo la observación). Las matemáticas de la relatividad son sin duda complicadas, aunque esta complejidad queda en gran medida compensada por la notable simplificación que introduce en el esquema global. Solamente la reducción de la gravedad y la inercia a un único fenómeno es suficiente para hacer de la teoría de la relatividad general una manera más eficiente de contemplar el mundo.

Einstein subrayó este aspecto en 1921 cuando dio una conferencia en la Universidad de Princeton sobre relatividad general: «La posibilidad de explicar la igualdad numérica entre la inercia y la gravitación mediante la unificación de su naturaleza otorga a la teoría de la relatividad general, de acuerdo con mis convicciones, tal superioridad sobre las concepciones de la mecánica clásica, que todas las dificultades que debe superar son pequeñas en comparación.»

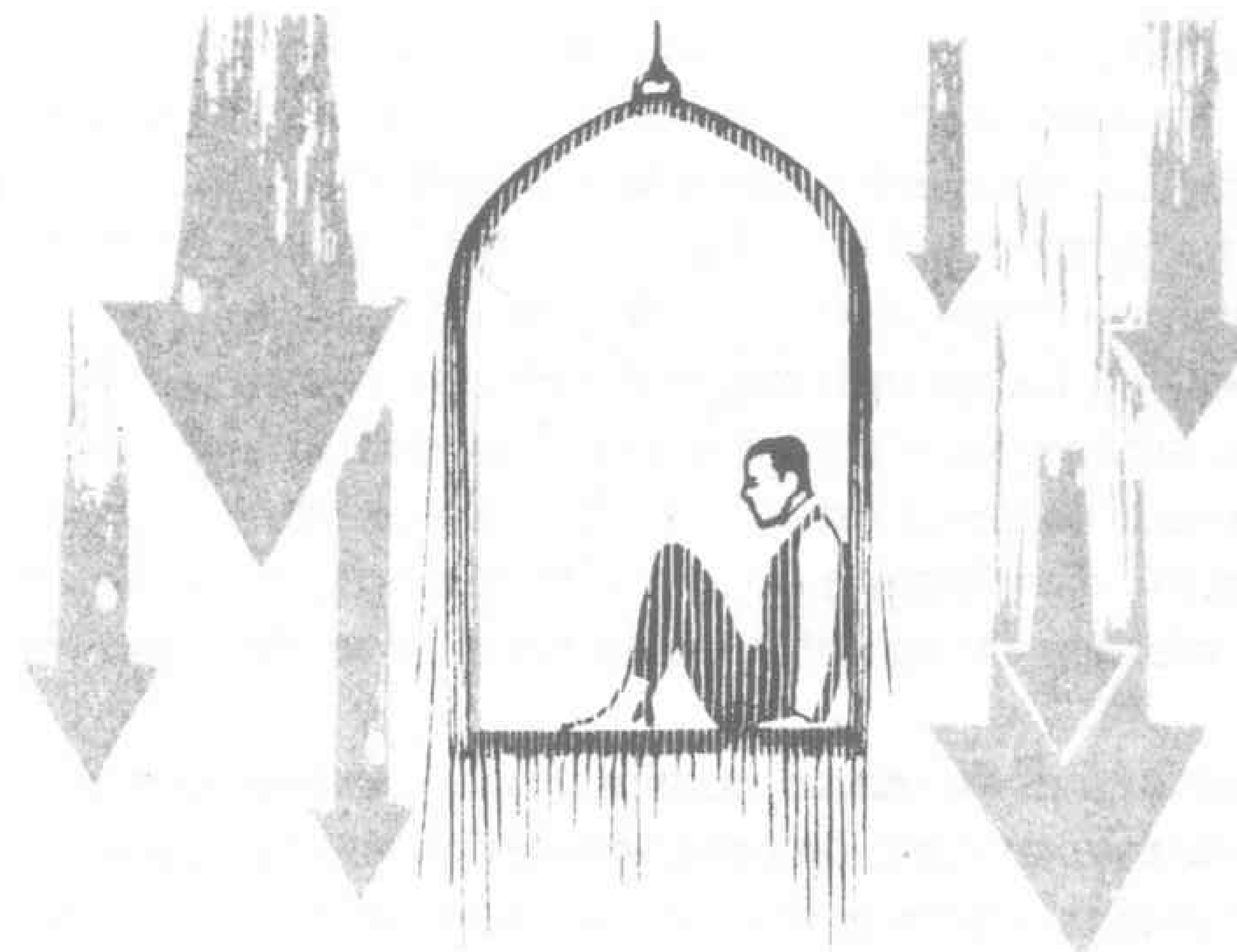
Además de todo esto, la teoría de la relatividad tiene lo que a los matemáticos les gusta llamar "elegancia": un cierto toque de grandeza artística. «Cualquier amante de la belleza», declaró Lorentz en una ocasión, «debe desear que sea verdadera.»

El principio de equivalencia de Einstein —la equivalencia entre la gravedad y la inercia— hace posible sostener que todo movimiento, incluso el acelerado, es relativo. En el interior del ascensor de Einstein que se mueve a través del Cosmos con velocidad acelerada se pueden observar efectos

inerciales. Pero el ascensor puede convertirse teóricamente en un sistema de referencia fijo, en reposo. En ese caso es el Universo entero, con todas sus galaxias, el que se mueve a velocidad acelerada dejando atrás al ascensor. *Este movimiento acelerado del Universo genera un campo gravitatorio.* Este campo es el responsable de que los objetos en el interior del ascensor ejerzan una presión contra el suelo. Se puede decir que estos efectos son gravitatorios y no inerciales.

Pero, ¿qué es lo que sucede *en realidad?* ¿Se mueve el ascensor ocasionando efectos inerciales o se mueve el Universo produciendo los efectos gravitatorios? La pregunta está mal formulada. No hay movimiento absoluto "real". Hay solamente un movimiento relativo entre el ascensor y el Universo. Este movimiento relativo genera un campo de fuerzas, descrito por las ecuaciones de campo de la teoría de la relatividad general. El campo se puede llamar tanto inercial como gravitatorio, dependiendo de la elección del sistema de referencia. Si se considera un sistema de referencia ligado al ascensor, el campo se denomina gravitatorio. Si el sistema de referencia es el propio Cosmos, el campo se llama inercial. Inercia y gravedad son meramente dos palabras que pueden aplicarse a la misma situación. Naturalmente, es mucho más sencillo, más conveniente, pensar que es el Universo el que está fijo. Nadie consideraría seriamente llamar gravitatorio al campo del ascensor que se mueve aceleradamente hacia arriba. La teoría de la relatividad general dice, sin embargo, que *es lícito* llamar gravitatorio a este campo si se elige un sistema de referencia adecuado. No se puede efectuar ningún experimento dentro del ascensor que demuestre que dicha elección es "errónea".

Cuando se dice que el observador en el ascensor no puede determinar si el campo que lo empuja hacia el suelo es inercial o gravitatorio, *no* se quiere decir que no pueda discernir la diferencia entre este campo y el campo gravitatorio que



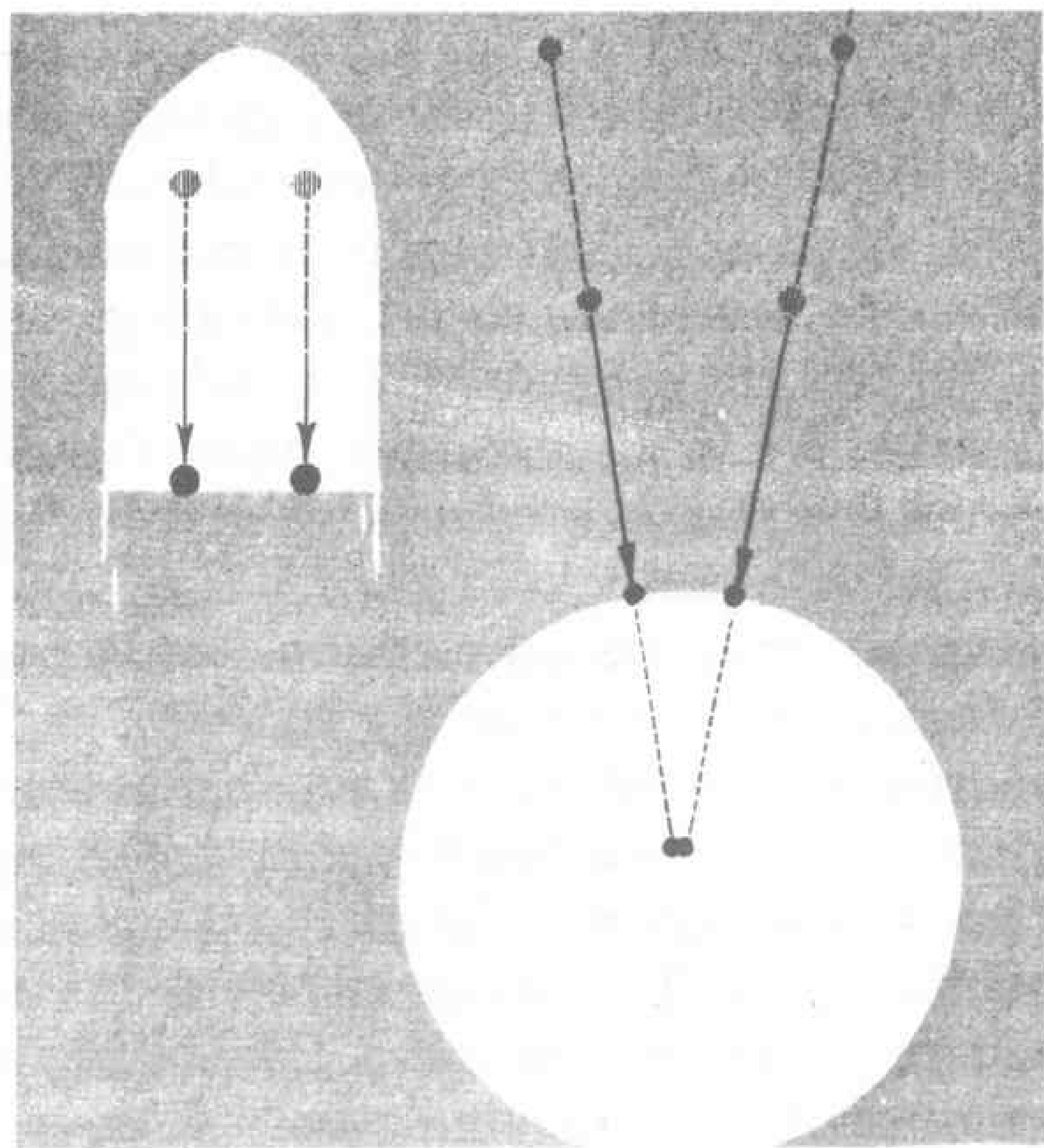
rodea un cuerpo material de gran tamaño, como un planeta. El campo gravitatorio de la Tierra, por ejemplo, posee una estructura esférica que no puede ser reproducida acelerando un ascensor en el espacio. Si se sostienen dos manzanas a un palmo de distancia y se dejan caer desde una gran altura, se irán acercando una a otra al caer, ya que cada manzana cae a lo largo de una vertical que se dirige hacia el centro de la Tierra. En el ascensor en movimiento, sin embargo, todos los objetos caen en trayectorias paralelas.

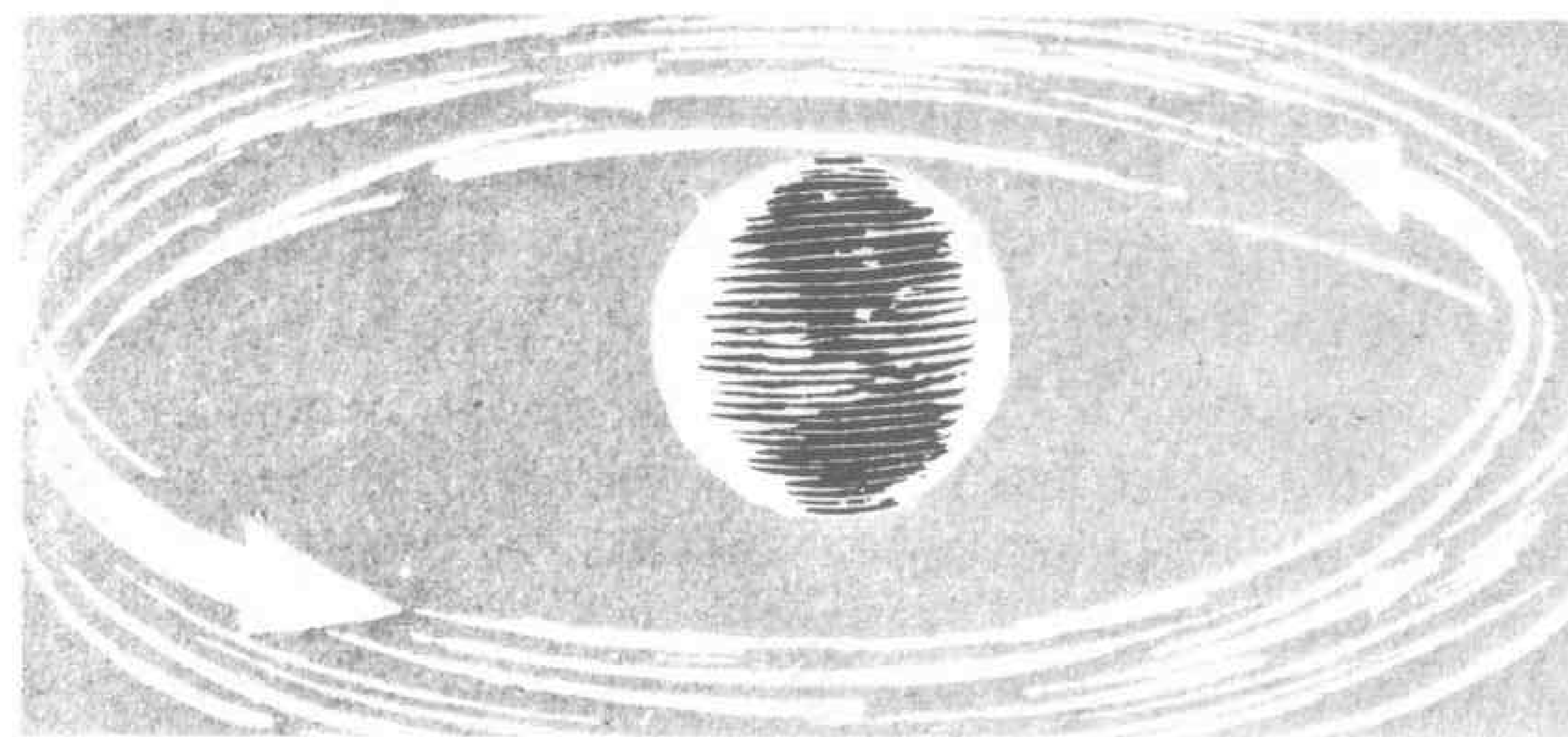
La diferencia entre los dos campos puede ponerse de manifiesto, asimismo, mediante el siguiente experimento ideal. Si dos manzanas se dejan caer en un ascensor acelerado hacia arriba, estando una directamente un metro por encima de la otra, la distancia entre las mismas permanece constante a medida que caen. No ocurre lo mismo si se dejan caer desde una cierta altura sobre la Tierra. En este último caso la distancia entre las mismas irá *aumentando.* Esto es debido a

que cuanto más abajo está un objeto, más se acelera respecto de un objeto que se encuentre por encima de él, dado que se encuentra más acerca del centro de la Tierra que el otro.

Combinemos estos dos efectos para ver qué le ocurre a un gran objeto esférico cuando cae hacia el centro de un intenso campo gravitatorio creado por un objeto de gran masa como el Sol. La no uniformidad del campo achatará la esfera por los lados y la alargará en la dirección de la caída. Los astrónomos llaman a este efecto "fuerzas de marea". Son fuerzas que pueden llegar a provocar la desintegración de un pequeño planeta en su caída hacia un cuerpo de masa mucho mayor.

Las fuerzas de marea las ejercen los campos gravitatorios que rodean a cuerpos de gran masa, pero no los campos gravitatorios producidos por las aceleraciones. No existe ningún sistema de referencia desde el cual un observador no pueda

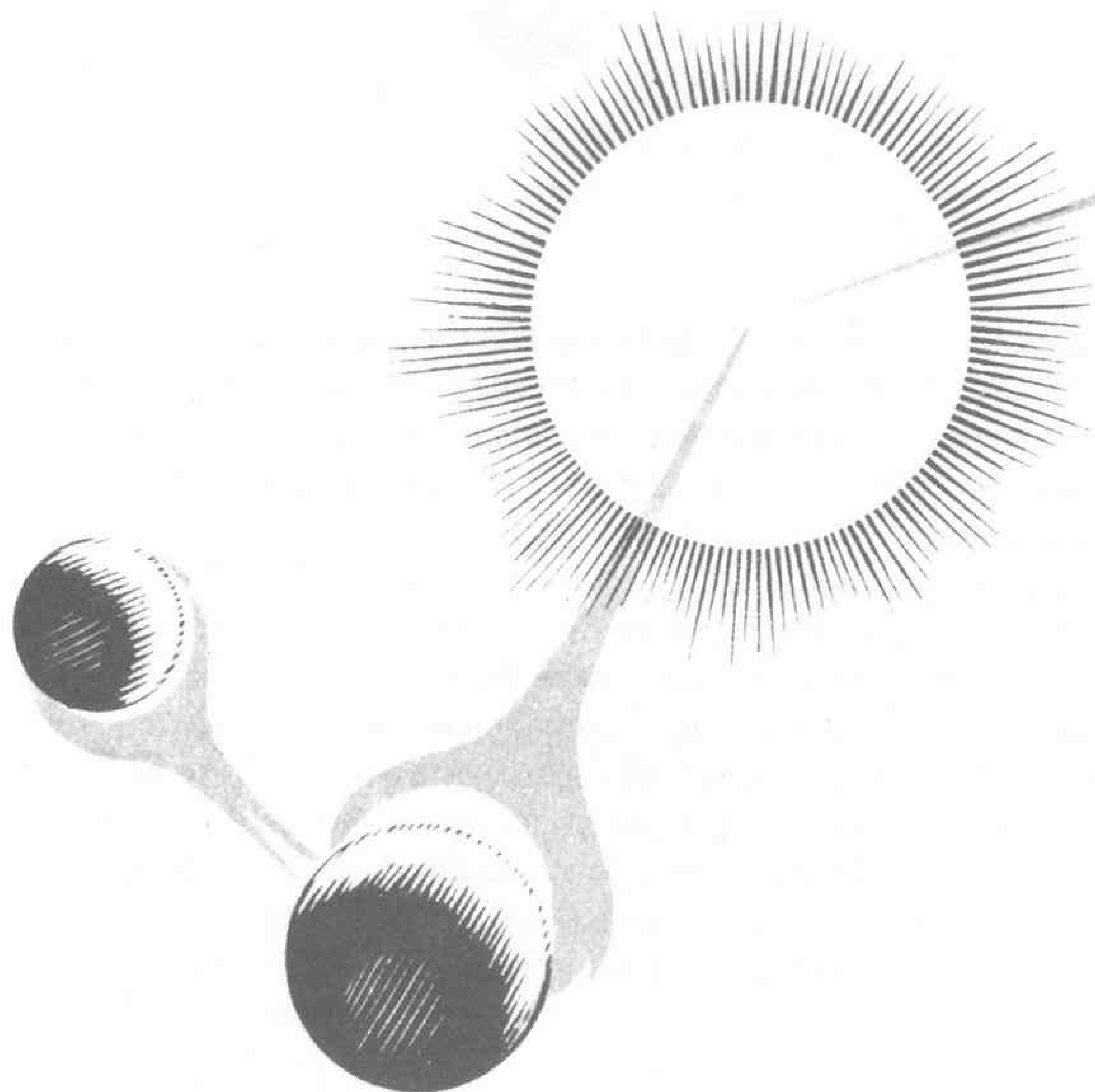




percibir los efectos de tales fuerzas de marea. Un observador situado en el interior del ascensor acelerado podría determinar experimentalmente la carencia de fuerzas de marea que le indicarían la estructura del campo. Esto no quiere decir que pueda distinguir entre inercia y gravedad. Sólo distingue campos con distintas estructuras geométricas. Localmente, sin embargo, los dos campos son indistinguibles. Este carácter local del sistema de referencia inercial es una característica esencial del principio de equivalencia de Einstein.

Una situación análoga se presenta al considerar la Tierra en rotación. La antigua polémica sobre si es la Tierra la que gira o si es el cielo el que gira a su alrededor (como pensaba Aristóteles) se reduce a una discusión sobre la elección más sencilla de un sistema de referencia. Evidentemente, la elección más sencilla es el Universo. Con respecto al Universo, decimos que la Tierra gira y que la inercia produce la protuberancia ecuatorial. Pero nada —excepto la inconveniencia consiguiente— nos impide elegir la Tierra como sistema fijo de referencia. De hacerlo, diríamos que el Cosmos gira alrededor de la Tierra, generando un campo gravitatorio que actúa sobre el ecuador. De nuevo, este campo no tiene la misma estructura matemática que el campo gravitatorio en

torno de un planeta, pero no obstante puede considerarse un verdadero campo gravitatorio. Si elegimos la Tierra como nuestro sistema fijo de referencia, ni siquiera entraremos en conflicto con el lenguaje diario. Decimos que el Sol sale por la mañana y se pone por la tarde, que la Osa Mayor gira alre-



dedor de la Estrella Polar. ¿Cuál es el punto de vista "correcto"?, ¿gira el firmamento o es la Tierra la que lo hace? La pregunta no tiene ningún sentido. Es como si una camarera preguntara a un cliente si desea la nata encima de la tarta o la tarta debajo de la nata.

Piénsese en el Cosmos como si ejerciera sobre cada objeto una especie de "sujeción" misteriosa. (En el capítulo 8 hablaremos de la procedencia de esta sujeción.) Lo extraño acerca de ella es que cuando un objeto se mueve uniformemente, el Universo no ofrece resistencia al movimiento. Tan pronto como se intenta obligar al objeto a seguir un movimiento no uniforme (acelerado), la sujeción actúa. Si el Universo es el marco fijo de referencia, la sujeción es la inercia del objeto: su resistencia a la modificación de su estado de movimiento. Si el marco fijo de referencia es el objeto, la sujeción se llama gravitatoria: el Universo, que se mueve de manera no uniforme, intenta arrastrar al objeto consigo.

La teoría de la relatividad general se resume a menudo como sigue: Newton dejó claro que si un observador se mueve uniformemente le es imposible poner de manifiesto su estado de movimiento mediante experimentos mecánicos. La teoría de la relatividad especial generaliza este principio para incluir *todo* tipo de experimentos, tanto ópticos como mecánicos. La teoría general es otra generalización: una extensión de la teoría especial que incluye el movimiento no uniforme. No hay ningún experimento de ninguna clase, afirma la teoría general, mediante el cual un observador *en cualquier* tipo de movimiento pueda determinar si se mueve o está en reposo.

La teoría general se presenta a veces del siguiente modo: todas las leyes de la naturaleza son invariantes (son las mis-

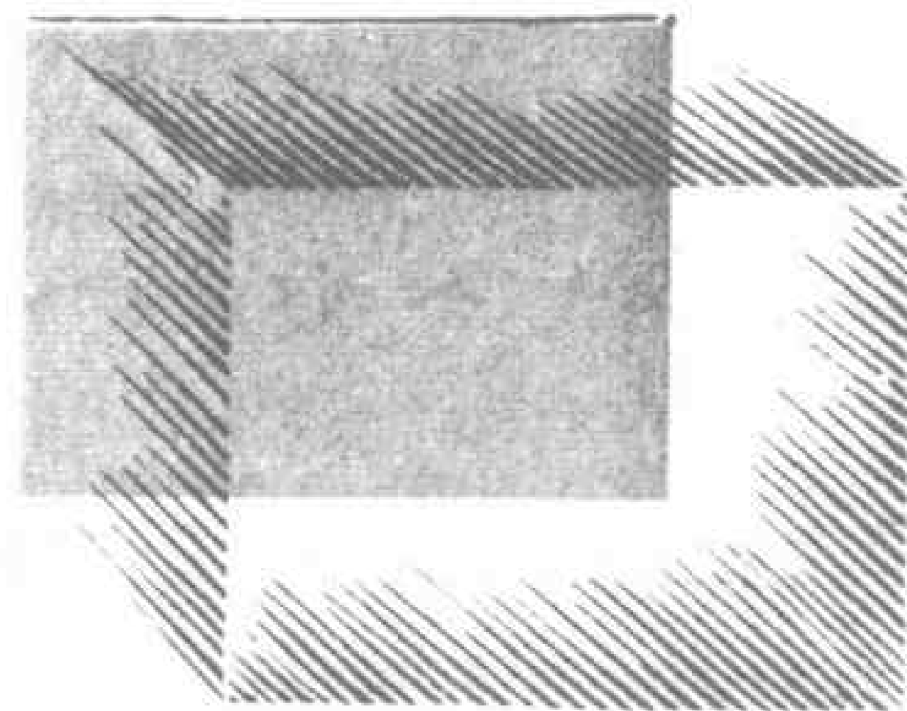
mas) con respecto a cualquier observador. Esto quiere decir que, sea cual fuere su estado de movimiento, todo observador puede describir todas las leyes de la naturaleza (tal como él las ve) mediante las mismas ecuaciones matemáticas. El observador puede ser un científico que trabaje en un laboratorio de la Tierra, o en la Luna, o en el interior de una gigantesca nave espacial que esté acelerándose lentamente en su camino hacia una estrella lejana. La teoría de la relatividad general le proporciona un conjunto de ecuaciones que le permiten describir todas las leyes de la naturaleza que intervengan en todos los experimentos que pueda realizar. Estas ecuaciones serán exactamente las mismas con independencia de que esté en reposo, en movimiento uniforme o en movimiento acelerado respecto a cualquier otro objeto.

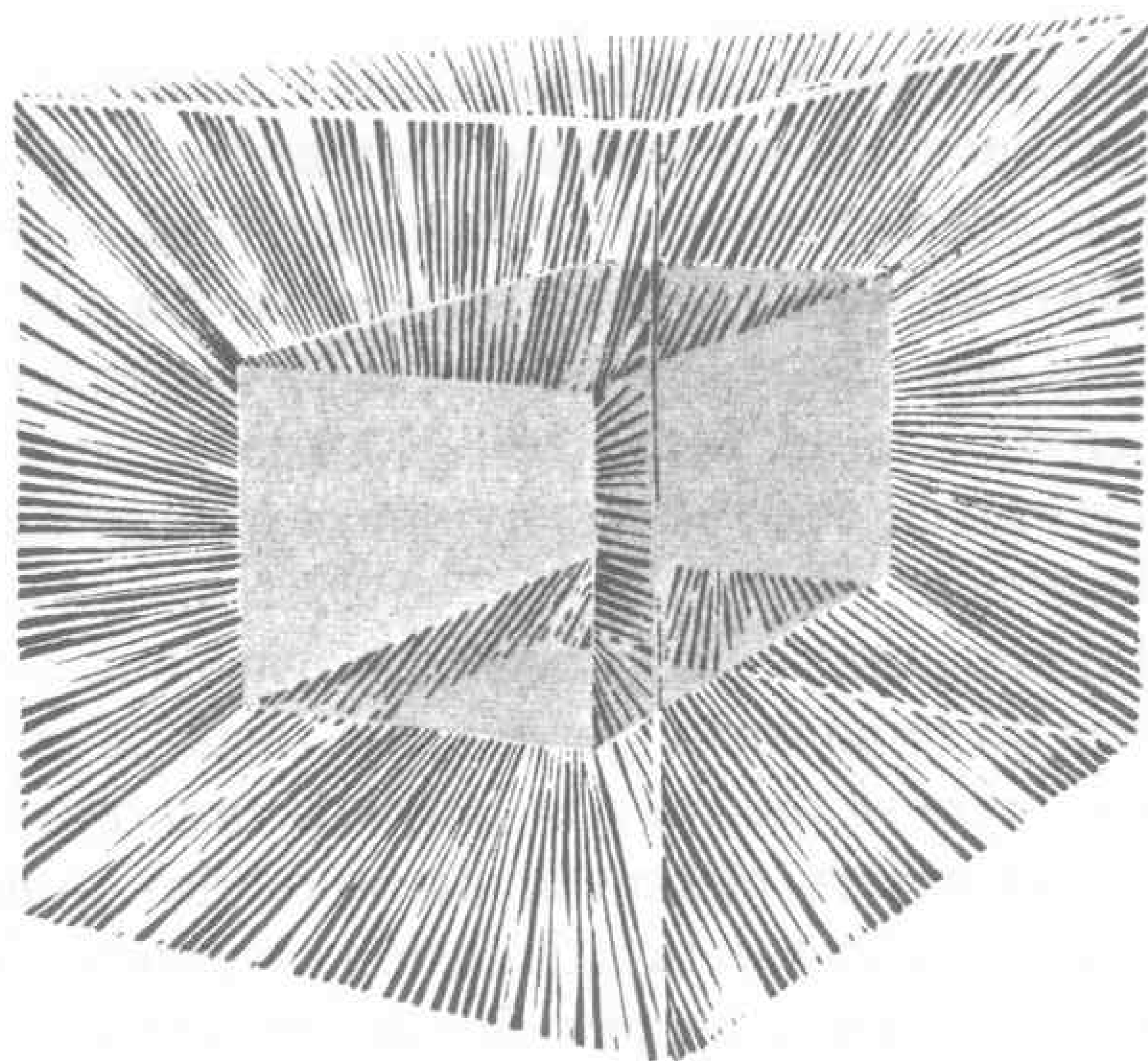
En el próximo capítulo nos ocuparemos más detenidamente de la teoría de la gravitación de Einstein y de su relación con un nuevo e importante concepto, conocido como espacio-tiempo.

VI. GRAVEDAD Y ESPACIO-TIEMPO

Antes de hablar de la teoría de la gravitación de Einstein, es necesario hacer unos cuantos comentarios, todos muy breves, sobre la cuarta dimensión y las geometrías no euclídeas. El matemático polaco Hermann Minkowski dio a la teoría de la relatividad una elegante interpretación en términos de un espacio-tiempo cuatridimensional. Muchas de las ideas presentadas en este capítulo se deben tanto a Minkowski como al propio Einstein.

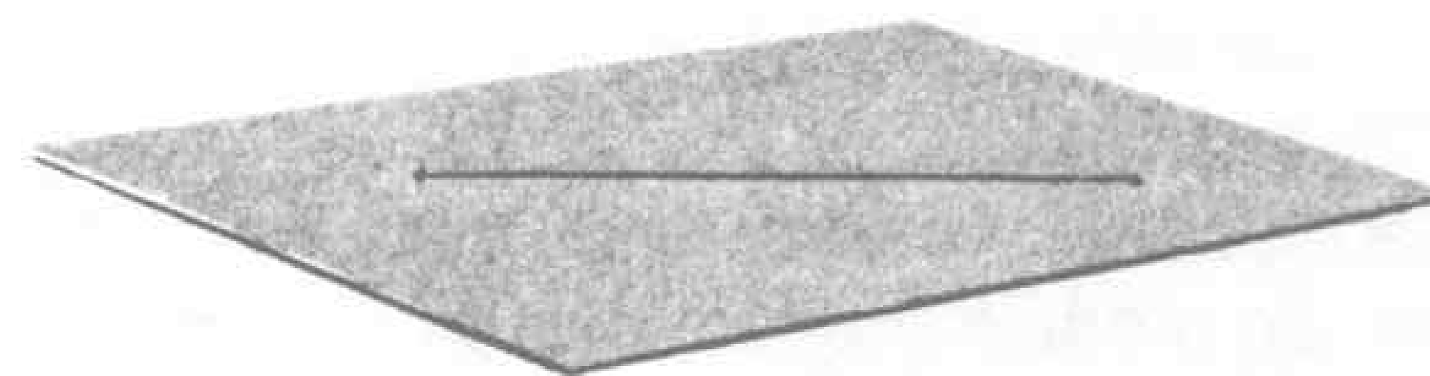
Considérese un punto geométrico. No tiene dimensión. Si se mueve en línea recta, genera una recta de una dimensión. Si esta recta se mueve a lo largo de una dirección perpendicular a la misma, genera un plano de dos dimensiones. Si este plano se mueve en una dirección perpendicular al mismo, genera un espacio de tres dimensiones. Esto es lo máximo que podemos imaginar. Sin embargo, un matemático puede concebir (no en el sentido de imaginarlo en su mente, sino en el de desarrollar las matemáticas necesarias) que este espacio tridimensional se desplaza en una dirección perpendicular a sus tres dimensiones. Esto genera un espacio euclídeo de cuatro dimensiones. No hay necesidad de detenerse en cuatro dimensiones. Se puede hablar de espacios de cinco, seis, siete o más dimensiones. Todos estos espacios son euclídeos. Son extensiones de la geometría euclídea en el





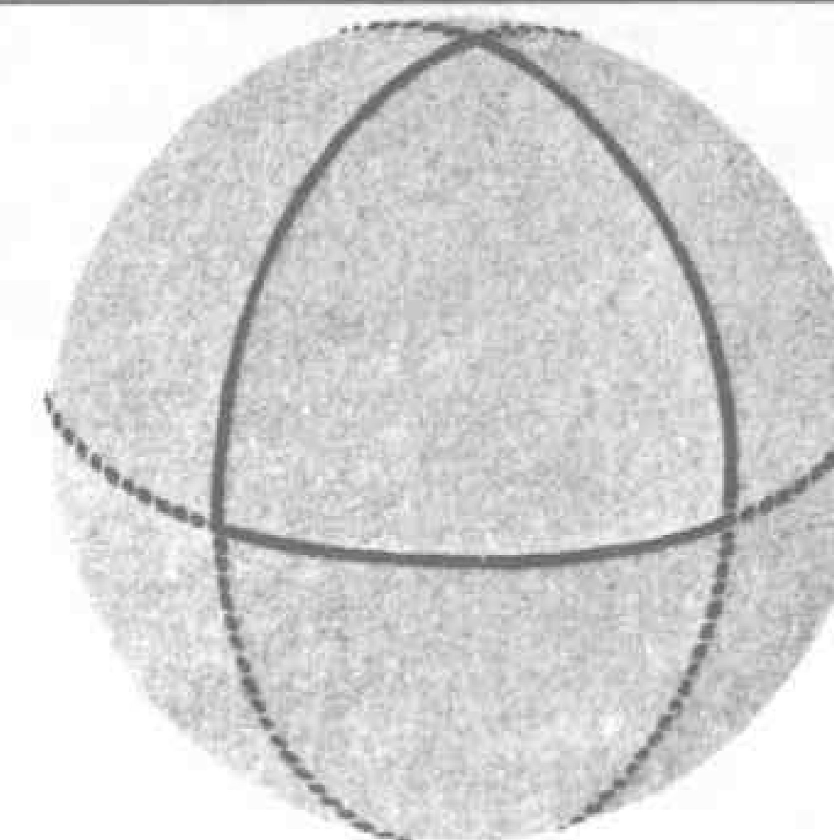
mismo sentido en que la geometría euclídea de tres dimensiones es una extensión de la geometría plana.

La geometría euclídea se basa en una serie de postulados, de los cuales el de las rectas paralelas es quizá el más notorio. Este postulado afirma que, en el plano, por un punto exterior a una recta pasa una y sólo una recta paralela a la recta dada. Un plano euclídeo al que este postulado es aplica-



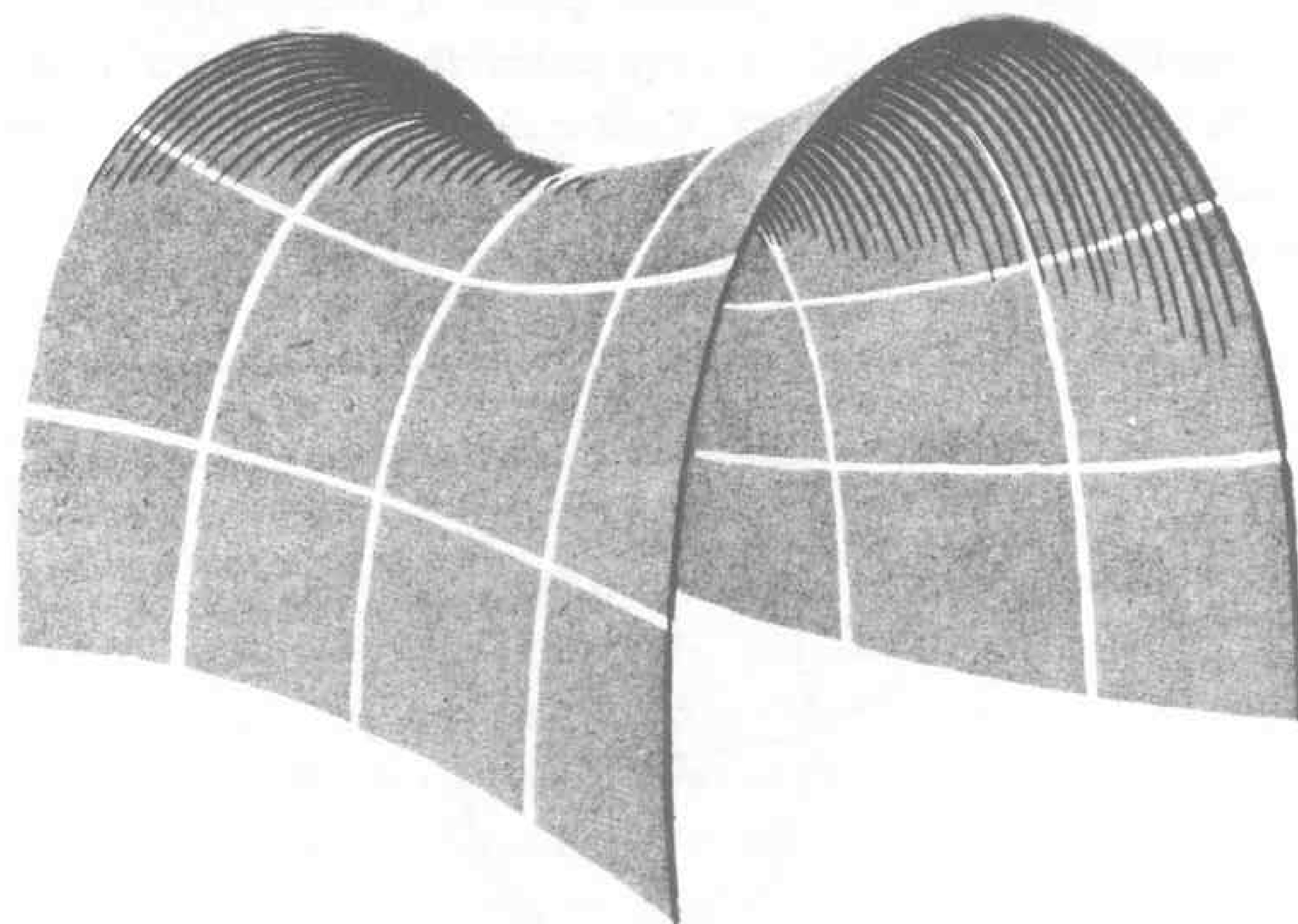
ble tiene curvatura cero y área infinita. Una geometría no euclídea es aquella en la que el postulado de las paralelas se sustituye por otro postulado distinto. Esto, esencialmente, se puede hacer de dos maneras.

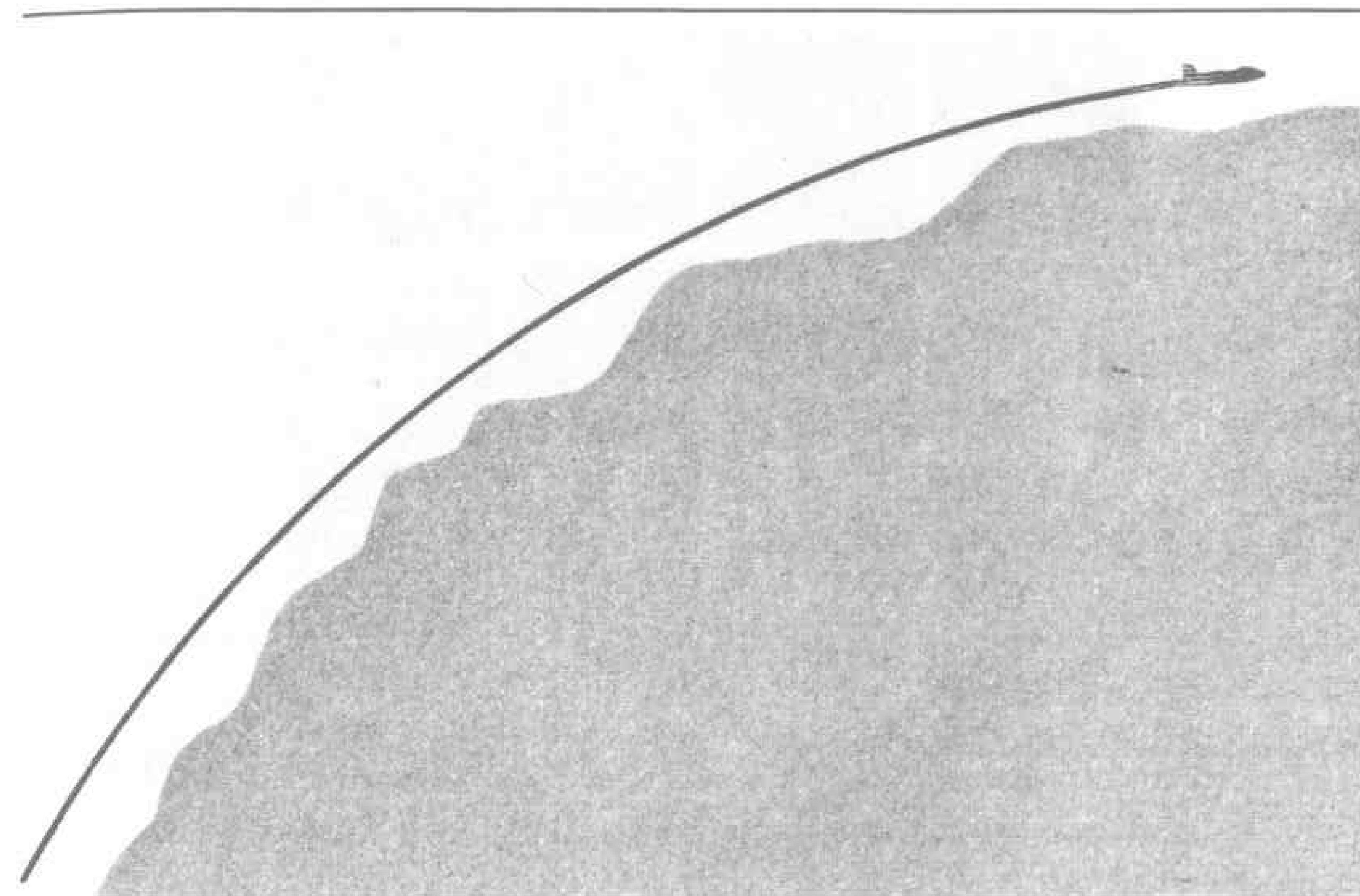
La primera de ellas, la llamada geometría elíptica, dice que, en el plano, por un punto exterior a una recta no se puede trazar *ninguna* recta paralela a la misma. La superficie de una esfera es un modelo esquemático (aunque no exacto) de este tipo de plano no euclídeo. Sobre una esfera, la "distancia más corta" entre dos puntos es un arco de círculo máximo (un círculo de diámetro igual al de la esfera). Todos los círculos máximos se intersecan entre sí, de manera que en esta geometría no puede haber paralelas. Un plano no euclídeo de estas características se dice que tiene curvatura positiva. Esta curvatura hace que el plano se curve sobre sí mismo. Tiene área finita, no infinita.



En el segundo tipo de geometría no euclídea, la llamada geometría hiperbólica, el postulado de las paralelas se sustituye por otro postulado que afirma que, en el plano, por un punto exterior a una recta pasan infinitas rectas paralelas a la recta dada. Un modelo esquemático de un trozo de este tipo de plano nos lo ofrece una superficie en forma de silla de montar. Una superficie de estas características se dice que tiene curvatura negativa. No se cierra sobre sí misma. Al igual que un plano euclídeo, se extiende hasta el infinito en todas direcciones.

Tanto la geometría elíptica como la hiperbólica son geometrías no euclídeas de curvatura constante. Esto quiere decir que la curvatura es la misma en todas partes; los objetos no sufren distorsiones al moverse de un lugar a otro. Un tipo más general de geometría no euclídea, usualmente llamada *geometría de Riemann,* permite que la curvatura varíe de un punto a otro.

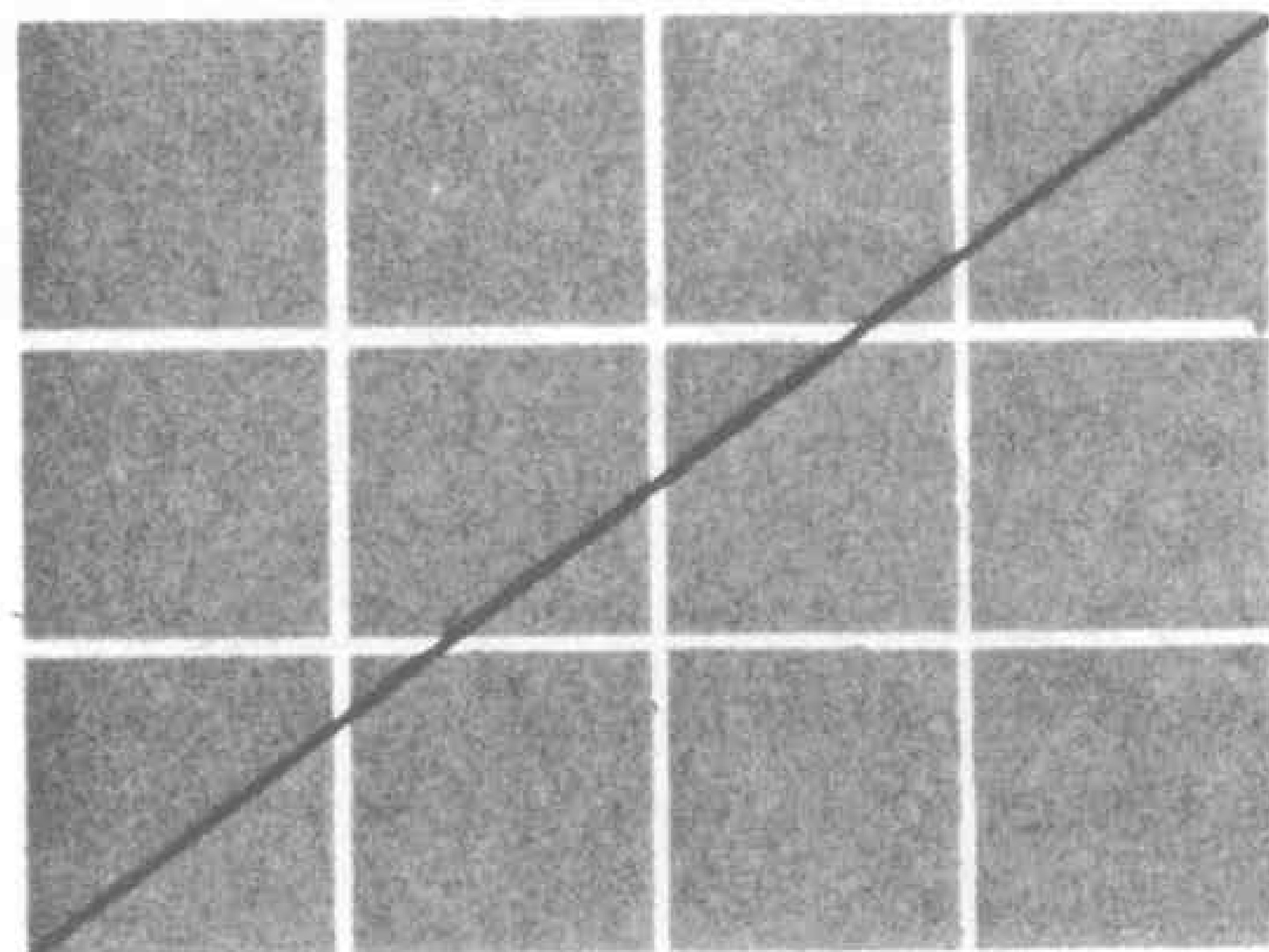




Del mismo modo que existen geometrías euclídeas de 2, 3, 4, 5, 6, 7, ... dimensiones, también existen geometrías no euclídeas de 2, 3, 4, 5, 6, 7, ... dimensiones.

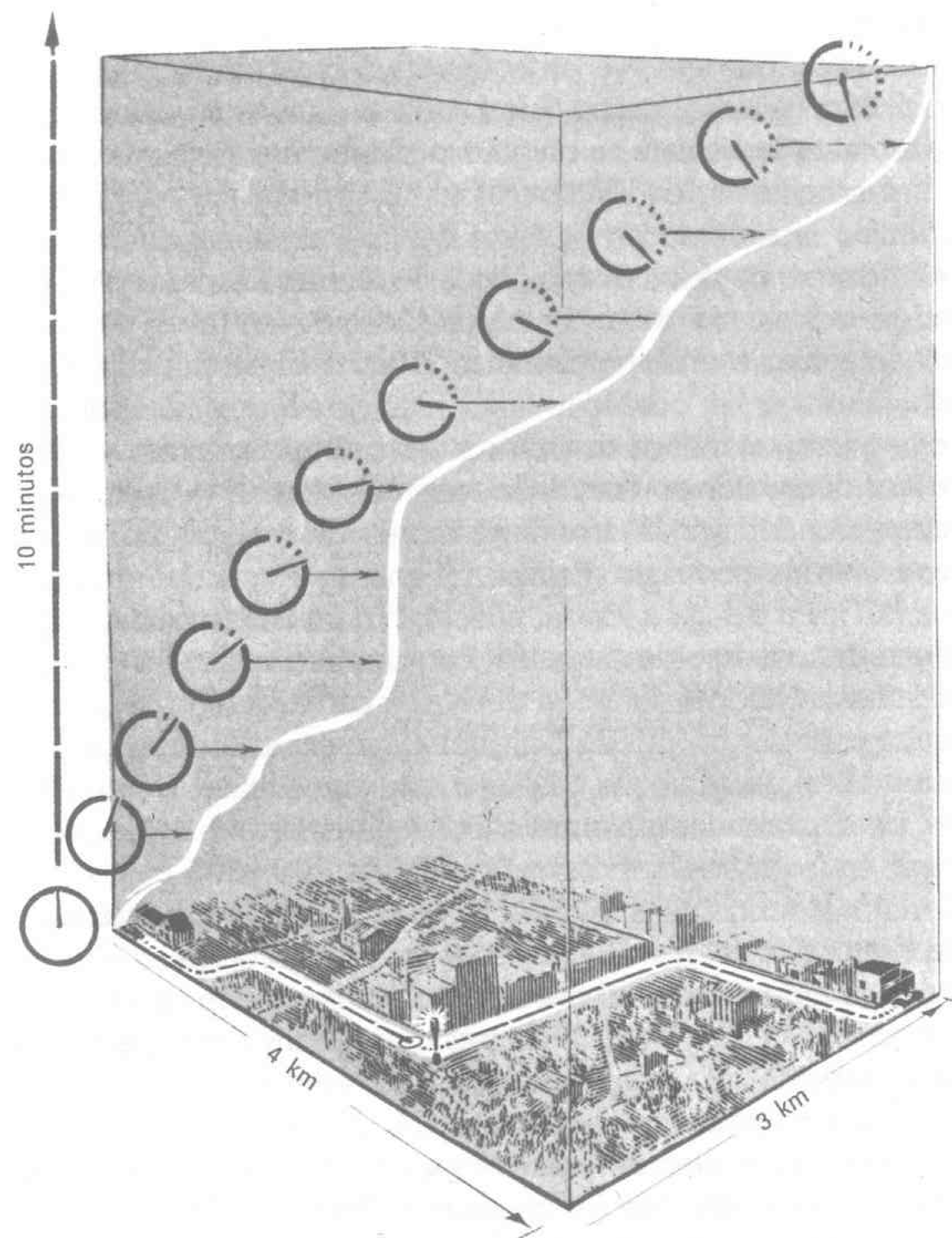
Al desarrollar la teoría de la relatividad general, Einstein creyó necesario adoptar una geometría de Riemann cuatridimensional. Sin embargo, en lugar de una cuarta dimensión espacial, Einstein hizo del *tiempo* la cuarta dimensión. No hay nada misterioso u oculto en ello, significa simplemente que cada suceso que tiene lugar en el Universo es un suceso que ocurre en un mundo cuatridimensional de espacio-tiempo, es decir, se puede describir mediante tres coordenadas espaciales y una temporal.

Consideremos, por ejemplo, el siguiente suceso. Usted sube a su coche a las 2 de la tarde y conduce desde su casa hasta un restaurante que se encuentra 3 kilómetros al sur y 4 kilómetros al este de su casa. En un plano bidimensional, la distancia verdadera desde su casa hasta el restaurante es la



hipotenusa de un triángulo rectángulo de catetos 3 y 4 kilómetros. Esta hipotenusa tiene una longitud de 5 kilómetros. Pero al conducir hasta el restaurante recorrió también una cierta "longitud" en el tiempo, digamos, diez minutos. Esta duración temporal puede representarse en un gráfico tridimensional. Una de las coordenadas del gráfico corresponde a la distancia hacia el sur en kilómetros. Otra coordenada corresponde a la distancia hacia el este en kilómetros. La coordenada vertical es el tiempo en minutos. En este diagrama tridimensional de espacio-tiempo, el "intervalo" (distancia en el espacio-tiempo) entre los dos sucesos (abandonar su casa y llegar al restaurante) se indica por una línea recta.

Esta línea recta no es la gráfica del verdadero viaje. Es simplemente una medida de la distancia espaciotemporal entre los dos sucesos. Una gráfica del viaje real sería una curva bastante complicada, ya que su coche acelera cuando arranca y la disposición de las calles impide que su coche viaje en línea recta. Quizá se detuvo en algún semáforo a lo largo del camino y, en cualquier caso, tuvo que acelerar negativamente al detener el coche. La complicada gráfica sinuosa correspondiente al viaje real se denomina en relatividad la "línea de universo" del viaje. En este caso, se trata de una línea de uni-



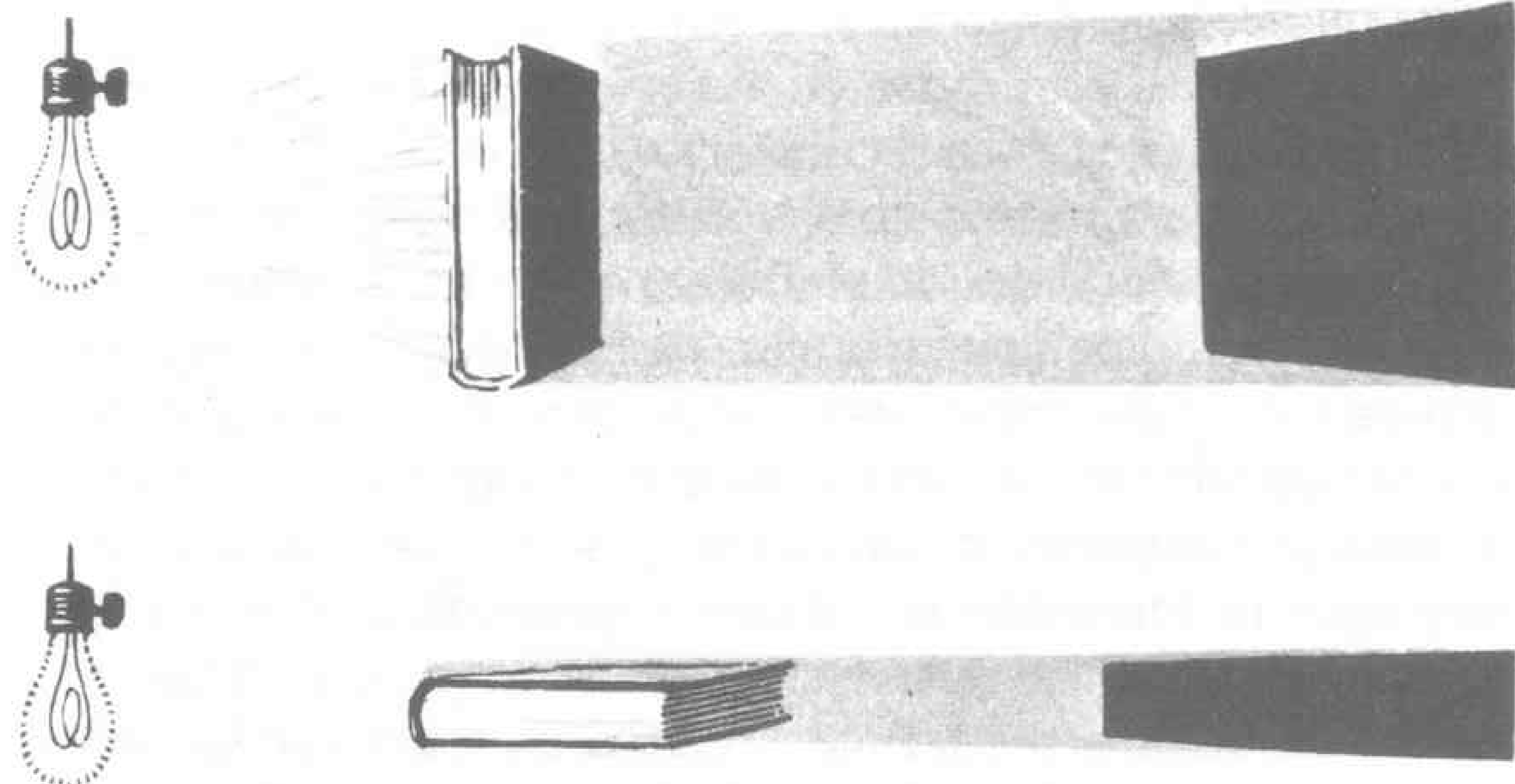
verso en un espacio-tiempo de tres dimensiones, o (como se dice también a menudo) un espacio de Minkowski tridimensional.

Dado que el viaje en coche tuvo lugar en un plano de dos dimensiones, fue posible añadir la dimensión del tiempo y representar el viaje en un gráfico tridimensional. Cuando los sucesos ocurren en el espacio tridimensional, no es posible dibujar una verdadera gráfica del espacio-tiempo cuatridimensional, pero los matemáticos poseen medios de manejar tales curvas sin tener necesidad de dibujarlas. Tratemos de imaginar a un hipercientífico cuatridimensional capaz de construir curvas cuatridimensionales con la misma facilidad con que un científico ordinario puede dibujar gráficos en dos o tres dimensiones. Tres de las coordenadas en su espacio se corresponden con las tres dimensiones del nuestro. La cuarta coordenada es nuestro tiempo. Si una nave espacial abandona la Tierra y llega a Marte, nuestro hipercientífico dibujará la línea de universo de este viaje como una curva en su gráfico cuatridimensional (la línea debe ser curva debido a que la nave espacial no puede hacer el viaje sin acelerar en algún momento). Al igual que en el ejemplo precedente, el "intervalo" de espacio-tiempo entre el despegue y el aterrizaje aparecerá en la gráfica como una línea recta.

En la teoría de la relatividad, cada objeto es una estructura cuatridimensional situada en su línea de universo en el continuo cuatridimensional del espacio-tiempo. Si un objeto está en reposo con respecto a las tres dimensiones espaciales, sigue viajando a lo largo de la dimensión del tiempo. Su línea de universo es entonces una línea recta paralela al eje de los tiempos del sistema de coordenadas. Si el objeto se mueve a través del espacio con movimiento uniforme, su línea de universo seguirá siendo una recta, pero ya no paralela al eje de los tiempos. Si el objeto se mueve con movimiento no uniforme, su línea de universo será una curva.

Hablando propiamente, no se debería decir que un objeto se mueve a lo largo de su línea de universo, puesto que "moverse" implica moverse en el tiempo, y el tiempo *ya* está representado en la línea de universo. La línea de universo no es más que una manera conveniente de representar gráficamente los movimientos de un objeto en un espacio tridimensional. El hecho de que un gráfico de Minkowski sea una imagen estática y atemporal del mundo, no tiene nada que ver con la cuestión de si el futuro está o no completamente determinado por el presente. Un objeto que se mueve al azar, de una manera impredecible, puede representarse por medio de su línea de universo tan fácilmente como un objeto que se mueva de manera predecible. Cuando un suceso se ha producido, su gráfica de Minkowski lo fija en un "universo inmóvil" atemporal tal como sucede en una fotografía, pero esto no tiene nada que ver con el hecho de si el suceso debía o no ocurrir como ocurrió.

Estamos ahora en disposición de contemplar las contracciones de Lorentz-FitzGerald de la teoría especial desde un nuevo punto de vista: el punto de vista de Minkowski, que es el punto de vista de nuestro hipercientífico. Como hemos visto, cuando dos naves espaciales se cruzan en movimiento relativo, los observadores en cada una de ellas perciben algunos cambios en la forma de la otra, así como cambios en la marcha de los relojes de la otra nave. Esto es debido a que el espacio y el tiempo no son dos absolutos que existen independientemente uno del otro. Son, para decirlo de alguna manera, como las sombras proyectadas por un objeto cuatridimensional del espacio-tiempo. Si se sostiene un libro frente a una bombilla y se proyecta su sombra sobre una pared bidimensional, un giro del libro altera la forma de su sombra. En una determinada posición, la sombra será un rectángulo ancho y en una posición distinta la sombra será un rectángulo estrecho. El libro no cambia de forma; sólo su sombra bidi-



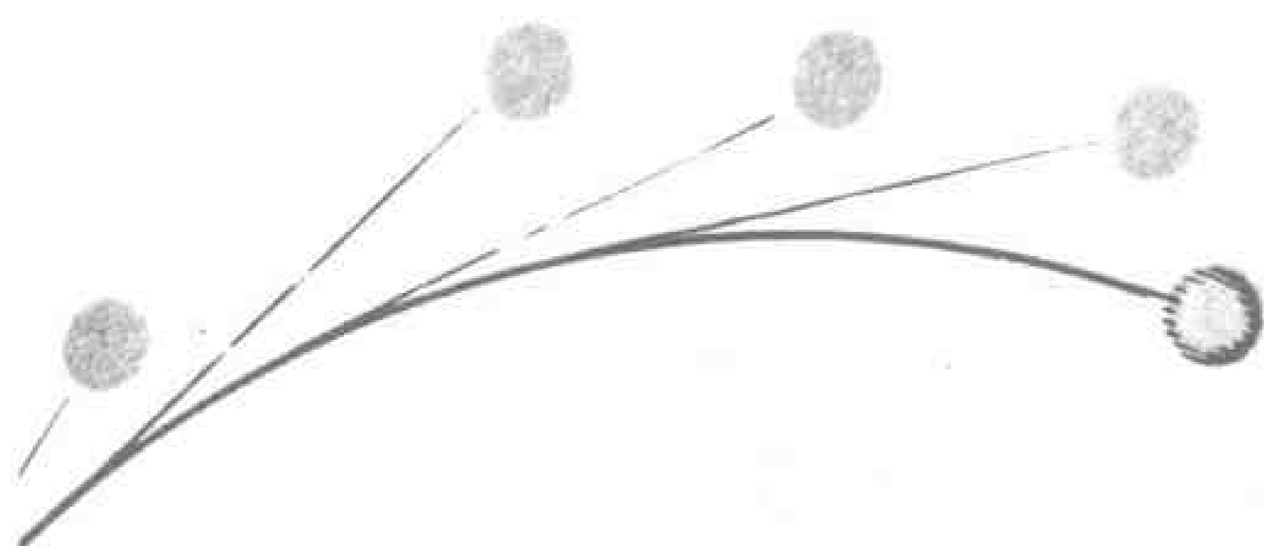
mensional se modifica. Análogamente, un observador ve una estructura cuatridimensional, digamos una nave espacial, desde diferentes proyecciones tridimensionales según su movimiento con respecto a esta estructura. En algunos casos la proyección muestra más parte de espacio y menos de tiempo; en otros casos ocurre lo contrario. Los cambios que observa en las dimensiones espacio-temporales de la otra nave pueden explicarse en términos de una cierta "rotación" de la nave en el espacio-tiempo, rotación que altera las sombras que proyecta en el espacio y el tiempo. Esto es lo que Minkowski tenía en mente cuando en Colonia (en 1908) inició una conferencia que después se haría célebre titulada "Espacio y tiempo". Este discurso está reproducido en *The Principle of Relativity,* de Albert Einstein y otros. Ningún libro sobre relatividad se puede considerar completo sin esta cita:

«Las consideraciones sobre el espacio y el tiempo que quisiera presentarles surgieron en el seno de la física experimental, y en ello radica su fuerza. Son radicales. De ahora en adelante el espacio en sí mismo y el tiempo en sí mismo están condenados a ser sombras; sólo un cierto tipo de unión entre los dos conservará una realidad independiente.»

Es importante darse cuenta de que la estructura del espacio-tiempo, la estructura cuatridimensional de la nave espacial, es tan rígida e invariable como lo era en física clásica. Ésta es la diferencia esencial entre la teoría de la contracción de Lorentz y la teoría de la contracción de Einstein. Para Lorentz, la contracción era una contracción real de un objeto tridimensional. Para Einstein, el objeto "real" es un objeto cuatridimensional que no cambia en absoluto. Simplemente se ve, por decirlo de algún modo, desde distintos ángulos. Su proyección tridimensional en el espacio y su proyección unidimensional en el tiempo pueden variar, pero la nave cuatridimensional en el espacio-tiempo permanece rígida.

Éste es otro ejemplo de cómo la teoría de la relatividad introduce nuevos absolutos. La forma cuatridimensional de un objeto rígido es una forma absoluta, invariable. Podemos cortar el espacio-tiempo de manera que la forma de la nave dependa del movimiento del marco de referencia desde el que efectuámos el corte, pero (como escribe J. J. C. Smart en la introducción a su antología, *Problems of Space and Time),* «el hecho de que podamos rebanar una salchicha en diferentes ángulos no nos obliga a abandonar una teoría absoluta de las salchichas». La teoría de la relatividad, continúa Smart, no toma partido en la disputa entre filosofías absolutas o relativas del espacio y el tiempo. Simplemente traslada el problema desde un espacio y un tiempo separados a un continuo espaciotemporal interrelacionado.

De modo semejante, el intervalo cuatridimensional entre dos sucesos cualesquiera en el espacio-tiempo es un intervalo absoluto. Observadores que se muevan a grandes velocida-



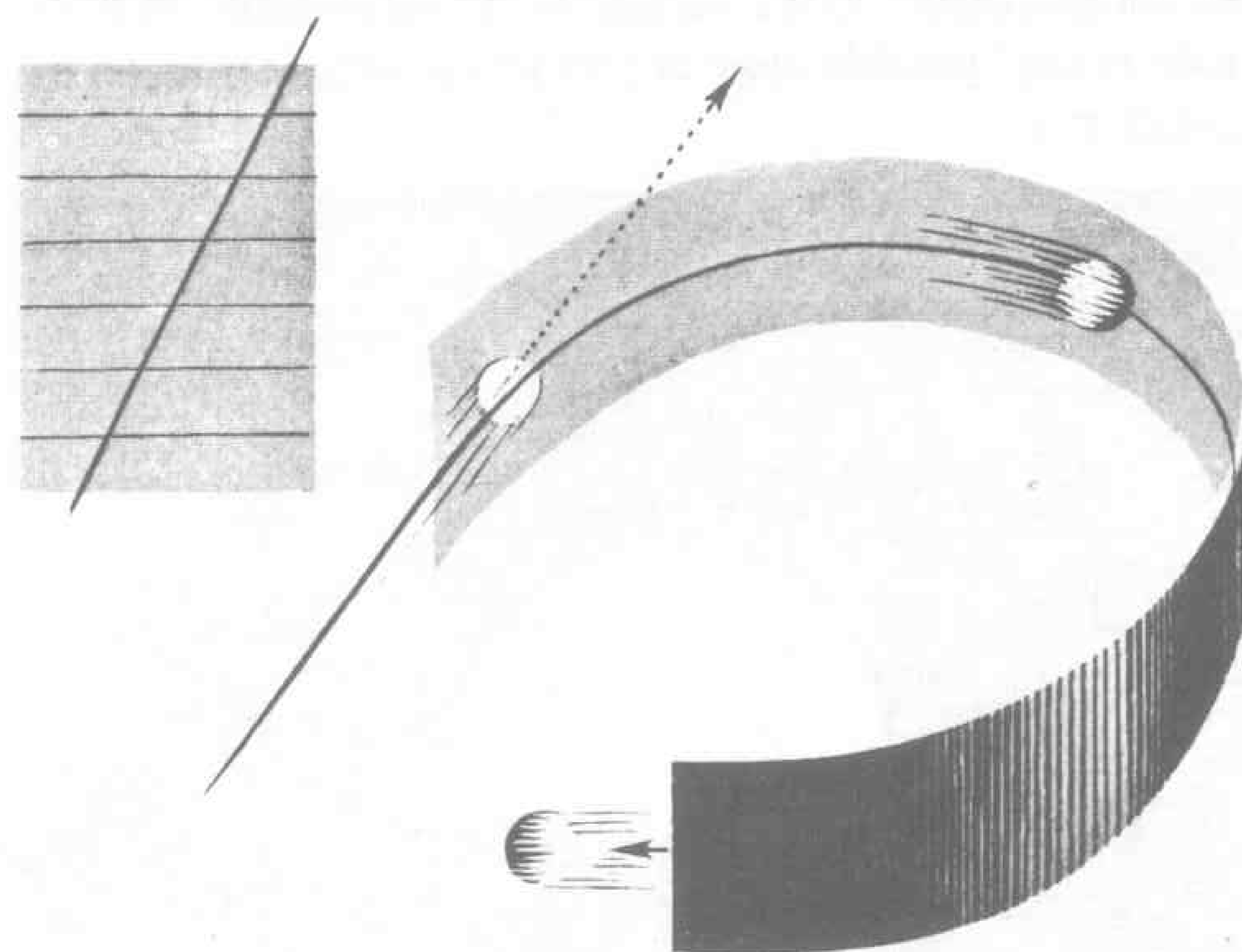
des y con diferentes movimientos relativos pueden no estar de acuerdo al juzgar la separación entre dos sucesos en el espacio o en el tiempo. Sin embargo, *todos* los observadores, con independencia de su estado de movimiento, coincidirán en la separación de los dos sucesos en el espacio-tiempo. Como dicen E. F. Taylor y J. A. Wheeler en su maravilloso libro de texto *Space-time Physics:* «El espacio es distinto para distintos observadores. El tiempo es distinto para distintos observadores. El espacio-tiempo es el mismo para todos.»

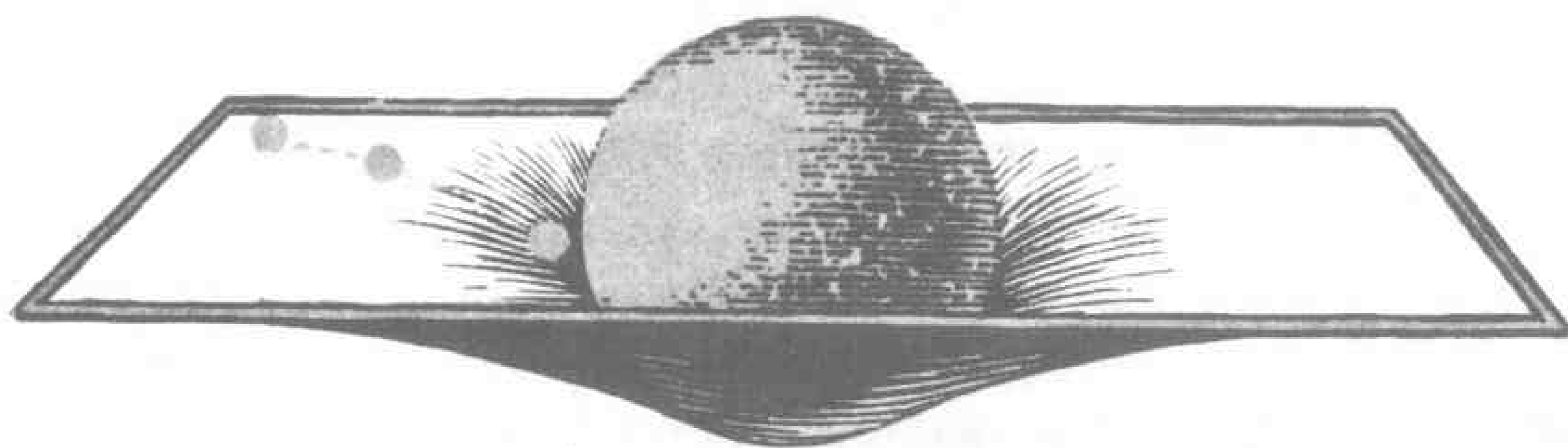
En el marco de la física clásica, un objeto se mueve a través del espacio en línea recta, con velocidad uniforme, a menos que sobre él actúe una fuerza. Un planeta, por ejemplo, se movería en línea recta si no fuera por la fuerza gravitatoria que el Sol ejerce sobre él. Desde esta perspectiva se dice que el Sol "arrastra" al planeta a una órbita elíptica.

En física relativista un objeto también se mueve en línea recta, con velocidad uniforme, a menos que sobre él actúe una fuerza; pero ahora la recta debe concebirse como una línea en el espacio-tiempo y no en el espacio tridimensional. Esto es cierto incluso en presencia de gravedad. La razón es que la gravedad, de acuerdo con Einstein, no es en absoluto una fuerza. El Sol no "tira" de los planetas. La Tierra no "tira" de la manzana que cae. Lo que ocurre es que un cuerpo material de gran tamaño, como el Sol, hace que el espacio-tiempo se curve a su alrededor. Cuanto más cerca del Sol, mayor es la curvatura. En otras palabras, la estructura del espacio-tiempo en la vecindad de los grandes cuerpos materiales no

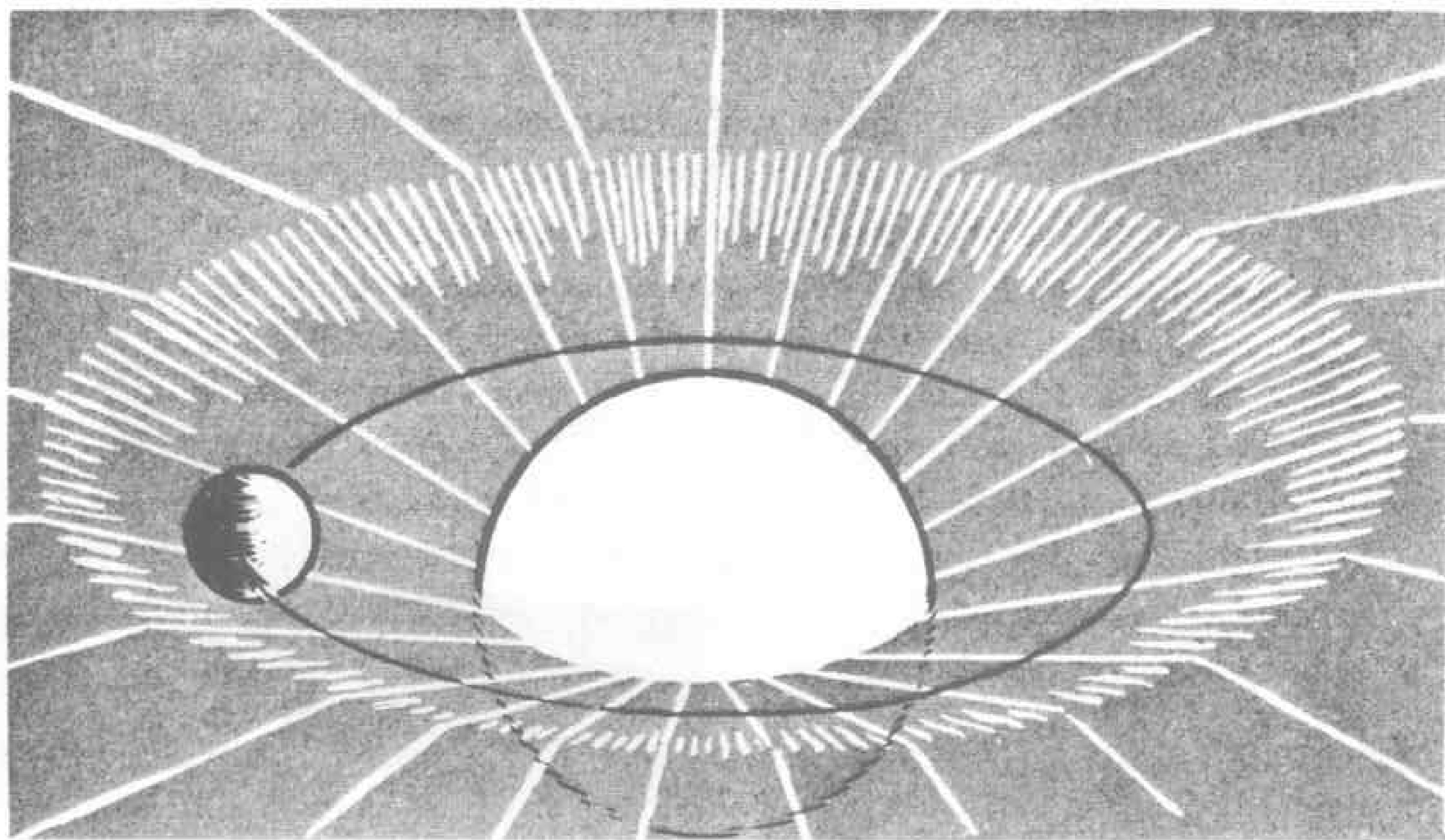
es euclídea. En este espacio no euclídeo, los objetos continúan siguiendo el camino más recto posible, pero lo que es recto en el espacio-tiempo parece curvo cuando se proyecta en el espacio. Si nuestro científico imaginario dibuja la órbita de la Tierra en su sistema de ejes cuatridimensional, lo que dibuja es una línea "recta". Nosotros, criaturas tridimensionales (más precisamente, criaturas que separan el espacio-tiempo en espacio tridimensional y tiempo unidimensional), vemos la trayectoria en el espacio como una elipse.

En los libros sobre la teoría de la relatividad, esto se explica a menudo del siguiente modo: imaginemos una superficie material deformable totalmente plana, como una sábana bien tensa. Si colocamos una naranja sobre la sábana se producirá una depresión. Una canica situada en las proximidades de la naranja caerá rodando hacia la misma. La naranja no "tira" de la canica, sino que ha creado un campo (la depre-



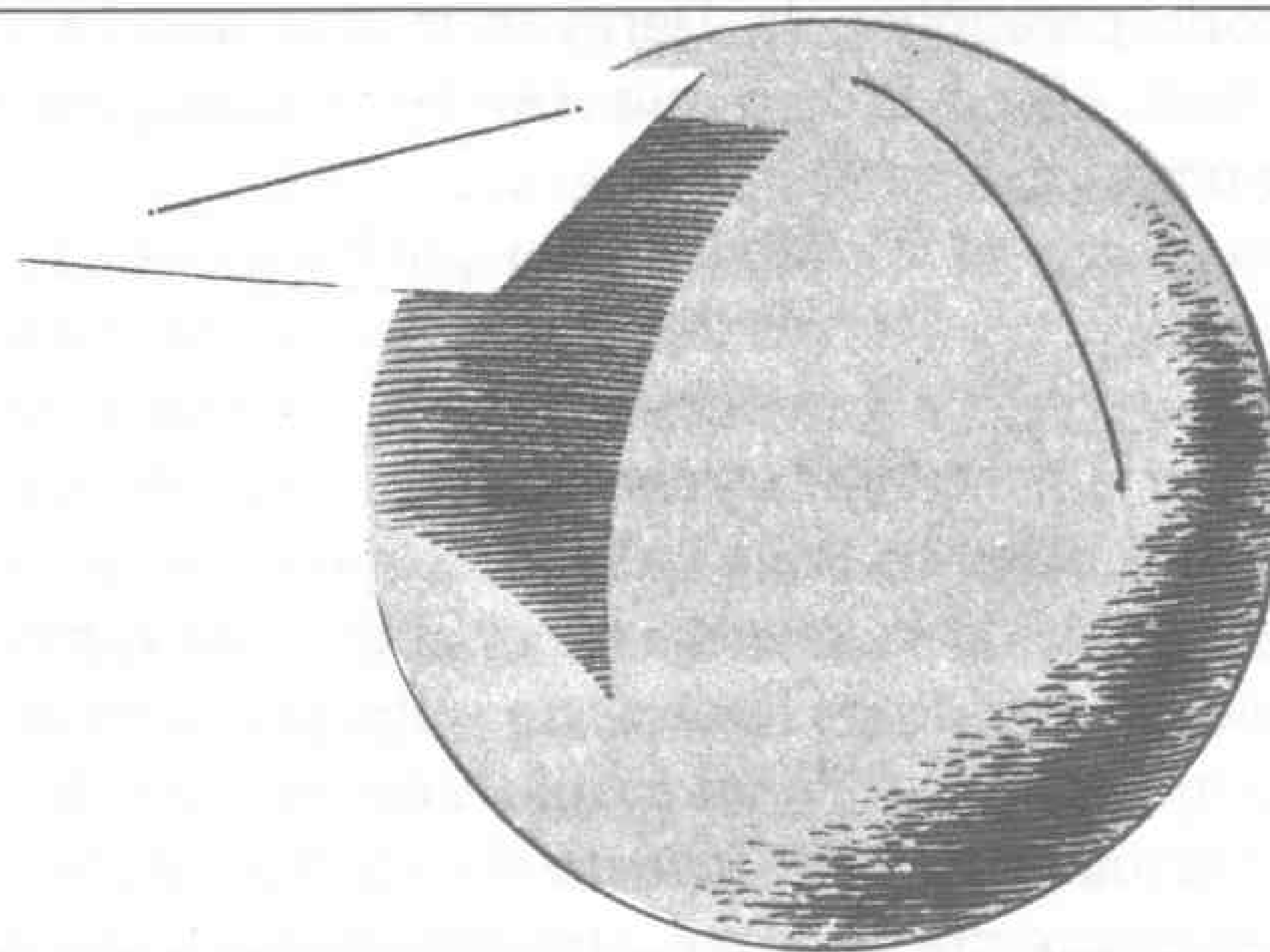


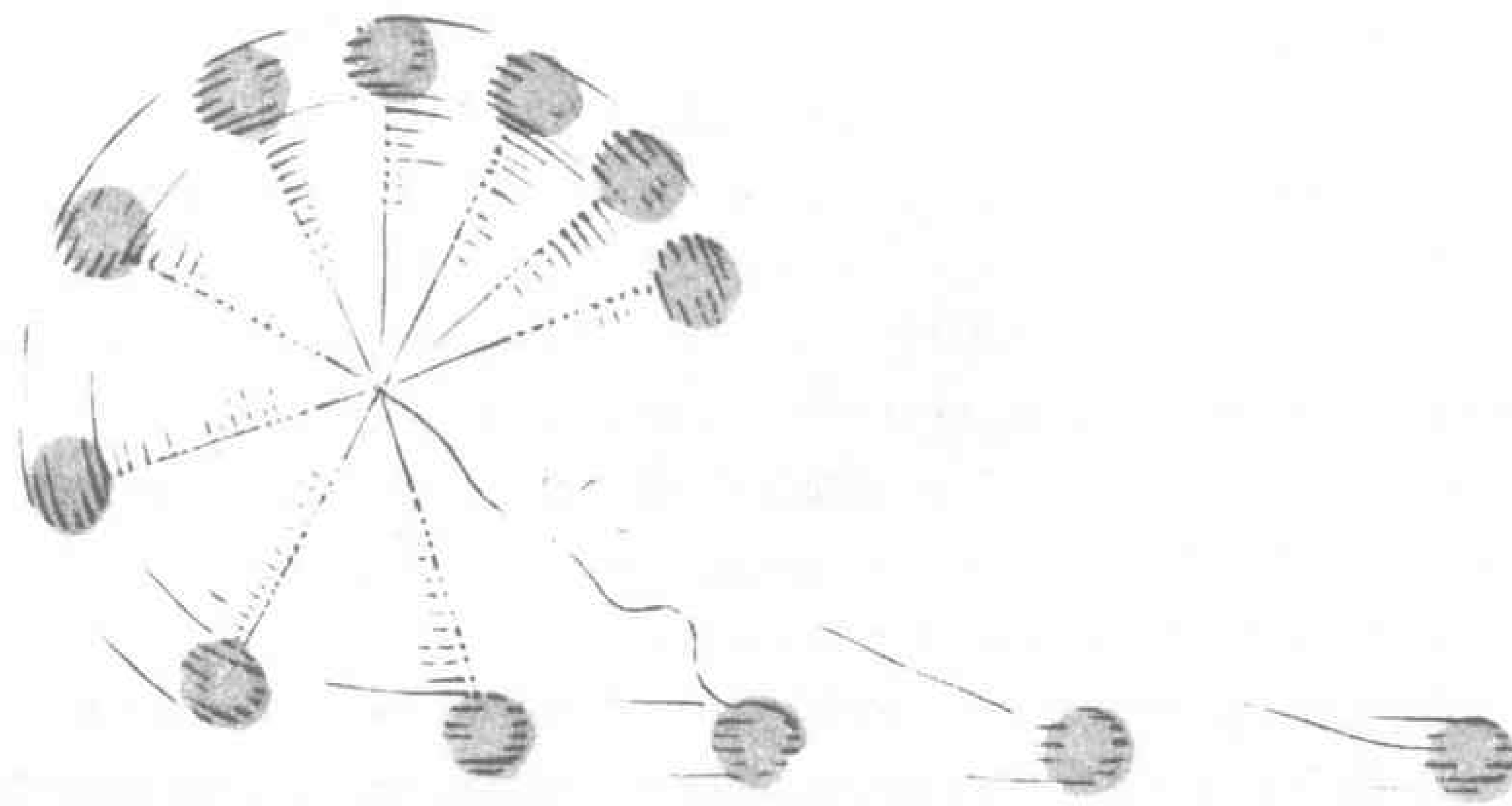
sión) con una estructura tal que la canica, siguiendo el camino de mínima resistencia, rodará hacia la naranja. De modo análogo (aunque esta analogía es realmente muy esquemática), el espacio-tiempo se deforma o distorsiona a causa de la presencia de objetos de gran masa como el Sol. Esta distorsión es el campo gravitatorio. Un planeta que gira alrededor del Sol no se mueve en una elipse porque el Sol tire de él, sino porque el campo es de tal forma que la elipse constituye el camino "más recto" posible que el planeta puede tomar en el espacio-tiempo.



El camino más recto recibe el nombre de geodésica. Ésta es una palabra tan importante en relatividad que vamos a tratar de explicarla más a fondo. En un plano euclídeo —por ejemplo, en una hoja plana de papel— el camino más recto entre dos puntos es una línea recta. Es también la distancia más corta. Sobre la superficie de un globo, una geodésica entre dos puntos es un arco de círculo máximo. Si se rodea el globo con una cuerda tan tensa como sea posible, marcará la geodésica. Ésta es tanto la distancia "más recta" como también la más corta entre dos puntos.

En una geometría cuatridimensional *euclídea*, donde todas las dimensiones son dimensiones espaciales, una geodésica es a la vez la línea más corta y la más recta entre dos puntos. Sin embargo, en la geometría *no euclídea* del espacio-tiempo de Einstein las cosas no son tan sencillas. Hay tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal, relacionadas entre sí según lo indican las ecuaciones de la relatividad. Esta estructura es tal que una geodésica, si bien es el camino más recto posible en el espacio-tiempo, es también el *más largo* y no el más corto. Esto es algo imposible de explicar sin





apelar a matemáticas muy complejas, pero tiene, sin embargo, una curiosa consecuencia: un cuerpo que se mueve únicamente bajo la influencia de la gravedad elige siempre el camino más largo; esto es, el camino en cuyo recorrido invierte más tiempo de acuerdo con su propio reloj. Bertrand Russell lo denomina "la ley de la pereza cósmica". La manzana cae directamente hacia abajo, un misil se mueve siguiendo una trayectoria parabólica, la Tierra se mueve a lo largo de una elipse, todo ello debido a que son demasiado perezosos para seguir otros caminos.

Esta ley de la pereza cósmica es la que hace que el movimiento de los objetos a través del espacio se atribuya a veces a la inercia y a veces a la gravedad. Si se ata una manzana con una cuerda y se la hace girar en círculos, la cuerda impide que la manzana se mueva en línea recta. Decimos que la inercia de la manzana tira de la cuerda. Si la cuerda se rompe, la manzana sale despedida en línea recta. Algo parecido ocurre cuando una manzana cae de un árbol. Antes de caer, la rama no deja que la manzana se mueva en el espacio. La manzana en el árbol se encuentra en reposo (relativamente a la Tierra),

pero avanza a lo largo del eje de los tiempos porque envejece constantemente. En ausencia de campo gravitatorio, este viaje a lo largo de la coordenada temporal se podría representar como una línea recta en un diagrama cuatridimensional. Sin embargo, la gravedad de la Tierra distorsiona el espacio-tiempo en las proximidades de la manzana. Esto hace que la línea de universo de la manzana sea una curva. Cuando la manzana se separa de la rama, continúa moviéndose en el espacio-tiempo, pero (tratándose de una manzana perezosa) elige el camino "más recto" y sigue una geodésica. Vemos esta geodésica como la caída de la manzana y atribuimos la caída a la gravedad. Sin embargo, también podríamos decir que es la inercia de la manzana, cuando ésta se libera súbitamente de su trayectoria curva, la que la lleva hasta el suelo.

Supongamos que, una vez caída la manzana, llega un muchacho y la golpea con su pie descalzo. Se hace daño, porque el golpe le lastima los dedos del pie. Un newtoniano afirmaría que la inercia de la manzana se resistió al golpe. Un einsteiniano puede decir lo mismo, pero también puede decir, si así lo prefiere, que los dedos del pie del muchacho hicieron que el Cosmos entero (incluyendo a los dedos) acelerara hacia atrás, creándose un campo gravitacional que tiró de la manzana con gran fuerza contra sus dedos. Es simplemente una cuestión de palabras. Matemáticamente, la situación se describe mediante un único conjunto de ecuaciones de campo en el espacio-tiempo, pero, gracias al principio de equivalencia, se puede explicar empleando los principios de Newton.

Aunque la teoría de la relatividad general sustituye la gravedad por una distorsión geométrica del espacio-tiempo, deja sin responder muchas preguntas. Esta distorsión, ¿se produce instantáneamente en todo el espacio o bien se propaga como un movimiento ondulatorio? Casi todos los físicos están de acuerdo en que la distorsión se mueve como una onda y que

estas ondas viajan a la velocidad de la luz. Hay también buenas razones para creer que, del mismo modo que las ondas electromagnéticas están asociadas a una diminuta partícula indivisible de energía denominada fotón, las ondas de gravedad tienen asociada una partícula de energía denominada "gravitón". En 1969, Joseph Weber, de la Universidad de Maryland, anunció que con la ayuda de su equipo experimental, compuesto de enormes cilindros de aluminio, había detectado radiación gravitatoria. Parecía proceder de cataclismos acaecidos en el centro de la Vía Láctea. Desde entonces, se han llevado a cabo docenas de intentos para confirmar la afirmación de Weber, algunos efectuados por físicos con equipo experimental más sensible que el empleado por Weber. Los resultados han sido siempre negativos. La creencia más generalizada, en la actualidad, es que Weber interpretó erróneamente sus resultados y que las ondas gravitatorias aún no han sido observadas.

En lo que se refiere a los gravitones, nadie tiene la más remota idea de cómo son, aunque muchos físicos intentan construir teorías que permitan predecir algunas de sus propiedades. Presumiblemente, el gravitón contiene un minúsculo pedazo de curvatura de espacio-tiempo, ya que de otro modo sería incapaz de transmitir curvatura a través del espacio. En el presente, los gravitones, al igual que los quarks, siguen siendo unos entes hipotéticos que, algún día, los físicos esperan capturar. En algunas de las nuevas y fascinantes teorías de partículas, el gravitón se concibe como un resorte unidimensional increíblemente diminuto, en forma de lazo cerrado, como una goma elástica.

En 1939, el famoso matemático y físico británico Paul Dirac presentó una teoría de acuerdo con la cual la gravedad se debilita lentamente a medida que el Universo se expande y su densidad disminuye. De hecho, la debilitación de la gravedad podría ser la causa, o al menos la causa parcial, de la

expansión del Universo (hablaremos de esta expansión en capítulos posteriores). Muchos físicos y astrónomos han considerado esta idea seriamente y han construido teorías similares*. Si la gravedad se está debilitando, los grandes objetos del Universo tenderán a expandirse. Esto podría explicar los resquebrajamientos de la corteza lunar y la de planetas como la Tierra y Marte, y también podría contribuir a la deriva de los continentes terrestres. Del mismo modo, el Sol podría estar expandiéndose. Dos mil millones de años atrás habría sido más pequeño, más denso y más caliente (hecho que explicaría las condiciones de vida tropicales que parecen haber prevalecido en la mayor parte de la Tierra en épocas geológicas anteriores).

La teoría de la relatividad general es una nueva manera de estudiar y describir la gravedad, pero ésta sigue siendo un fenómeno misterioso y mal comprendido. Nadie sabe, por ejemplo, la conexión que pueda tener (si es que tiene alguna) con el electromagnetismo. Einstein y otros han intentado desarrollar una "teoría del campo unificado" que uniera la gravedad y el electromagnetismo en un solo conjunto de ecuaciones matemáticas. Los resultados han sido desalentadores hasta la presente década de los ochenta, en que se ha propuesto una desconcertante variedad de ingeniosas teorías de gran unificación. Resuelven tantos y tan difíciles problemas a la vez que, en la actualidad, muchos físicos creen que nos encontramos a las puertas de lograr la unificación final de todas las partículas y fuerzas de la naturaleza.

* Véase Thomas C. Van Flandern, "Is Gravity Getting Weaker?", *Scientific American* (febrero, 1976).

VII. CONTRASTACIONES DE LA RELATIVIDAD GENERAL

¿Ha sido confirmada experimentalmente la teoría de la relatividad general? En el momento de publicarse la primera edición de este libro, los físicos se lamentaban de la debilidad de los datos en su favor, en contraste con los abundantes datos en favor de la teoría especial. Como señalaran Misner, Thorne y Wheeler en su voluminoso libro *Gravitation* (Freeman, San Francisco, 1973): «Durante sus primeros cincuenta años de existencia, la teoría de la relatividad general fue un paraíso para el teórico, pero un infierno para el experimentador. Nunca se concibió una teoría más hermosa, pero tampoco una más difícil de contrastar con la experiencia.»

Esto ya no es verdad. Los avances tecnológicos, especialmente en lo que respecta a la precisión de los instrumentos para medir el tiempo, han hecho posible contrastar la teoría de la relatividad general de muy diversas maneras, y no es descabellado predecir que antes de que acaben los años noventa se obtendrán más y mejores pruebas. Lo que sigue es un apunte esquemático de cómo la teoría de Einstein de la gravitación, el corazón de la teoría general, ha permanecido incólume ante los hechos durante los pasados sesenta años.

La primera gran prueba experimental de la teoría de la relatividad general tuvo que ver con la rotación de la órbita elíptica de Mercurio. Dado que Mercurio es el planeta más

cercano al Sol, su órbita es la menos circular de las órbitas planetarias. De ahí que sea más fácil medir la lenta precesión de la órbita, predicha tanto por la teoría newtoniana de la gravedad como por la teoría de Einstein. El eje mayor de la órbita de Mercurio gira alrededor del Sol a una velocidad relativa a la Tierra de 5,600 segundos de arco por siglo. Según la teoría newtoniana, y tomando en consideración la influencia de las perturbaciones gravitatorias ocasionadas por los otros planetas, la precesión del perihelio de la órbita de Mercurio (punto de la órbita más cercano al Sol) debería ser aproximadamente 43 segundos de arco por siglo *menor* de lo que se observa en realidad. Las ecuaciones de Einstein otorgan al diminuto planeta un tirón relativista adicional, por decirlo de algún modo, de exactamente el valor correcto de 43 segundos de arco por siglo.

¿Constituye esto una confirmación definitiva de la relatividad general? La mayoría de los físicos piensan que es así. Sin embargo, Dicke, el físico de Princeton que mencionamos en el capítulo anterior, no está tan convencido. Junto con un antiguo estudiante suyo, Carl Brans, ha desarrollado una teoría de la gravitación en la que el tensor de campo de Einstein, aunque da razón del 95 % de la gravedad, se combina con un campo escalar similar al de Newton. Según la teoría de Dicke, conocida como teoría tensoescalar, el tirón relativista sobre el eje de la órbita de Mercurio es menor que el proporcionado por la teoría de Einstein. La teoría de Brans-Dicke es la más importante de las nuevas teorías de la gravitación que modifican la relatividad general de modo significativo.

¿No sería posible, se pregunta Dicke, que algo haya pasado inadvertido al medir los diversos campos gravitatorios que actúan sobre Mercurio; algo que explicara la discrepancia entre la predicción de su teoría y la verdadera órbita del planeta? En la década de 1870, antes de que la teoría de Einstein

justificara de manera tan elegante la precesión residual de la órbita de Mercurio, algunos astrónomos habían conjeturado que un diminuto planeta (al que se llegó a dar el nombre de Vulcano) se encuentra entre el Sol y Mercurio, dando a Mercurio el pequeño tirón necesario. Pero esta hipótesis se abandonó en cuanto se dispuso de telescopios capaces de detectar tal planeta, si existiera. Se propusieron y rechazaron otros posibles orígenes del avance del perihelio de Mercurio. Sólo queda uno de ellos: quizás el Sol no es perfectamente esférico, sino que, al igual que la Tierra, esté achatado por los polos. El ensanchamiento ecuatorial del Sol aumentaría su influencia gravitatoria sobre Mercurio, haciendo que el efecto relativista del avance del perihelio del planeta fuera más próximo al predicho por la teoría tensoescalar de Dicke.

En 1964, Dicke y sus colaboradores empezaron a trabajar en un dispositivo destinado a medir la forma del disco solar. Consistía esencialmente en una rueda con dos muescas cortadas en puntos opuestos. La idea consistía en hacer girar esta rueda frente al Sol de manera que tapara toda la luz solar, a excepción de la procedente de su borde. Al ser el ecuador más excéntrico, pasaría más luz a través de las muescas cuando éstas pasaran delante del ecuador que cuando pasaran delante de los polos achatados, y esta variación en luminosidad ocasionaría un parpadeo luminoso. Dicke creía que midiendo este último se podría calcular la forma del disco solar con mayor precisión.

Dicke anunció sus resultados en 1967. No hay duda de que el Sol está achatado por los polos en un grado sorprendentemente próximo al predicho por su teoría. Este achatamiento, según Dicke, podría estar causado por un núcleo interior que girara muy deprisa. Los intensos campos magnéticos sobre la superficie del Sol, interactuando con el gas que lo rodea, podrían producir un efecto de frenado que haría disminuir la velocidad de rotación de la superficie al va-

lor observado de una vuelta cada veintiocho días, aproximadamente*.

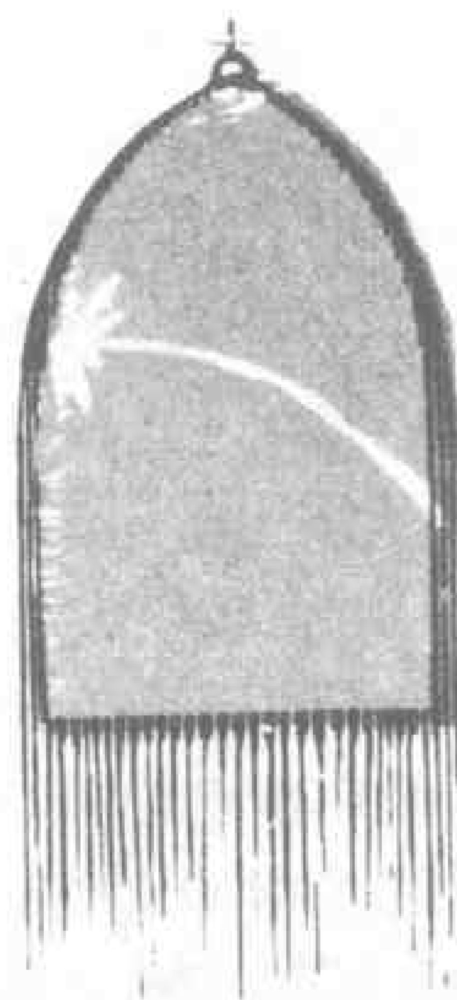
Desgraciadamente, se han encontrado muchas anomalías en intentos posteriores de medir la forma del disco solar y estas anomalías arrojan serias dudas sobre la exactitud de los resultados de Dicke. Dicke dio por supuesto que el mayor brillo en el ecuador del Sol es una muestra de su achatamiento. Los astrónomos, en la actualidad, creen que esta diferencia de brillo puede tener otras causas. En 1974, Henry Allen Hill, de la Universidad de Arizona, dio a la luz unas observaciones que le habían llevado a concluir que el aumento de luminosidad en el ecuador del Sol no tiene nada que ver con la forma del disco solar. Un año más tarde, publicó que la distribución de luminosidad en el disco solar oscila a diversas frecuencias con unos períodos que pueden variar desde unos pocos minutos hasta una hora. Otras observaciones más recientes han indicado que, en efecto, el Sol late como un inmenso corazón, pero hasta la fecha los astrónomos no se han puesto de acuerdo sobre la naturaleza y las causas de sus pulsaciones. En cualquier caso, se considera que los esfuerzos de Dicke para desacreditar la teoría de Einstein de la gravitación apelando a un Sol achatado han sido infructuosos.

La segunda predicción importante que hace la teoría de la relatividad general es que las rayas espectrales de la luz procedente del Sol deben mostrar un desplazamiento, aunque extremadamente pequeño, hacia la región roja del espectro. De acuerdo con las ecuaciones de Einstein, los campos gravitatorios intensos producen un efecto retardador en el tiempo. Esto quiere decir que cualquier proceso periódico, como las vibraciones de los átomos o el tictac de un reloj de cuerda, tendrá lugar en el Sol a un ritmo algo más lento que

* En realidad el Sol no gira como un sólido rígido. Cuanto mayor es la latitud, menor es la velocidad de rotación. Esto es lo que se conoce como la rotación diferencial del Sol. En el ecuador solar la velocidad de rotación es de 24 días. *(N. del T.)*

en la Tierra, es decir, la luz emitida por el Sol tendrá una frecuencia más baja: su espectro se desplazará hacia el rojo. Tal corrimiento se había observado, pero no fue hasta 1962 cuando se midió con la suficiente precisión para proporcionar una confirmación de la teoría general. Una estrella enana blanca muy próxima a Sirio, en la constelación del Can Mayor, conocida como la compañera de Sirio, es mucho más densa que el Sol y, por tanto, debería producir un mayor corrimiento hacia el rojo. Eddington se regocijó cuando tal desplazamiento fue observado. Sin embargo, estos resultados, más tarde, resultaron ser poco fiables. Medidas recientes de los corrimientos hacia el rojo de algunas enanas blancas han tenido más éxito. A principios de la década de los sesenta, empleando una técnica basada en el efecto Mössbauer (ver capítulo 9), se observó un corrimiento hacia el rojo en luz procedente de gas helio en una torre de 22,5 metros de altura de la Universidad de Harvard, corrimiento que se correspondía con un margen de error del 1 % con la predicción de la teoría de la relatividad general. Otras comprobaciones más recientes de los efectos de la gravedad sobre el tiempo serán expuestas en el capítulo 9.

La que sin duda fue la más espectacular de las primeras confirmaciones de la relatividad general tuvo lugar en 1919 durante un eclipse total de Sol. Einstein razonaba del siguiente modo: si en el espacio interestelar se arrastra un ascensor con movimiento acelerado, un rayo de luz que viaje de una a otra pared en su interior se curvará según una trayectoria parabólica. Esto podría considerarse como un efecto inercial. Sin embargo, de acuerdo con la relatividad general, se puede pensar que el ascensor es el marco fijo de referencia y considerar la curvatura del rayo de luz como un efecto gravitatorio. La gravedad es capaz, por consiguiente, de desviar la trayectoria de los rayos de luz. Esta curvatura es demasiado pequeña para que pueda detectarse en un experimento de laborato-



rio, pero los astrónomos pueden medirla durante un eclipse total de Sol. Dado que el disco solar se oscurece durante un eclipse total, las estrellas que se encuentran muy próximas al borde del disco se hacen visibles. La luz que nos llega de estas estrellas pasa por una zona muy próxima al Sol (se dice que son estrellas rasantes) donde el campo gravitacional del mismo es más intenso. Cualquier corrimiento en las posiciones aparentes de estas estrellas indicará que el Sol curva la luz procedente de las mismas. Cuanto mayor sea el desplazamiento, tanto mayor será la curvatura.

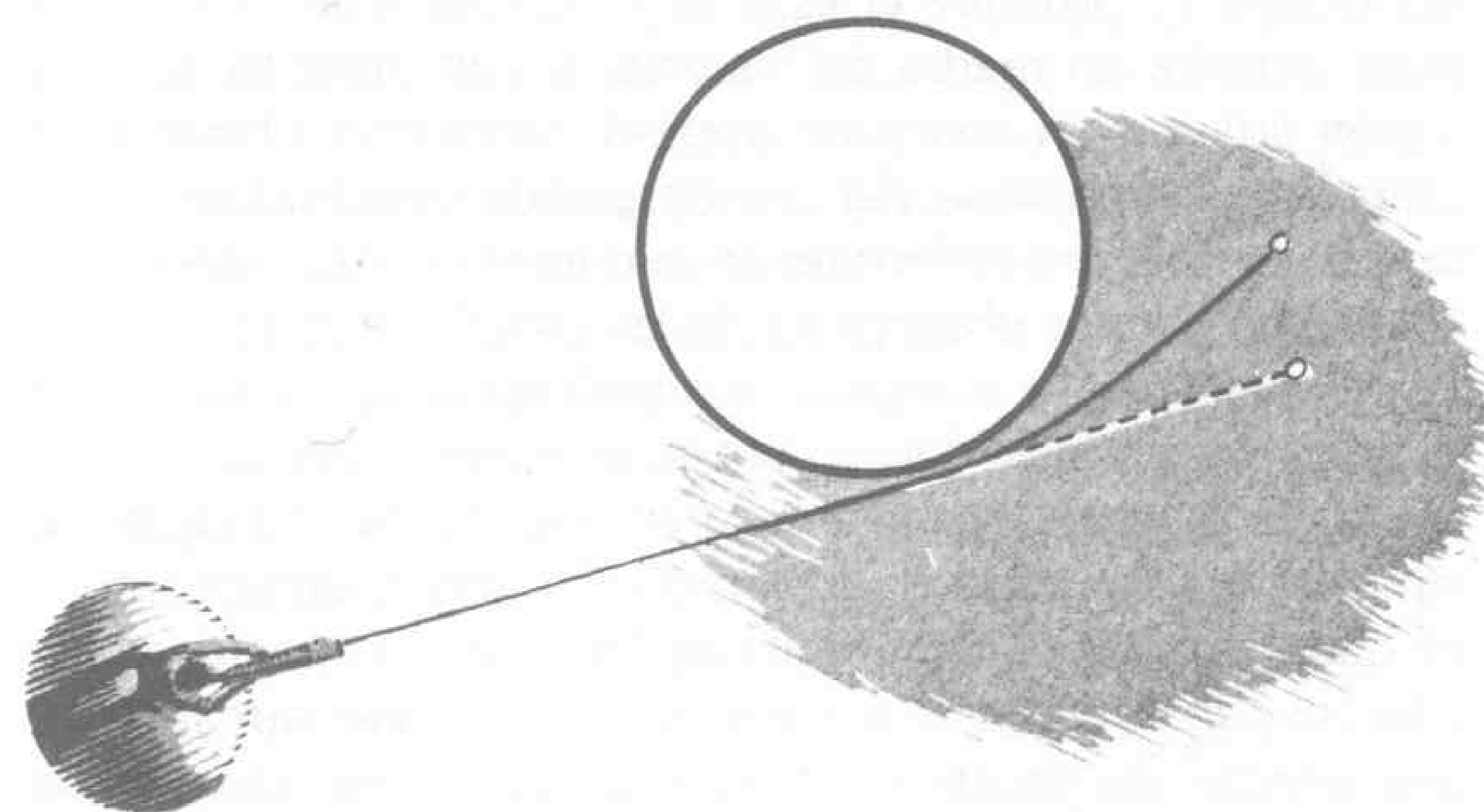
Hagamos una advertencia: cuando se habla de la "desviación" de las trayectorias de los rayos de luz a causa de la gravedad o de la inercia, se debe tener presente que ésta es simplemente una manera tridimensional de expresarse. En el espacio, la luz se desvía de su trayectoria recta. Sin embargo, en el espacio-tiempo cuatridimensional, la luz sigue moviéndose, como en la física clásica, a lo largo de geodésicas. Sigue el camino "más recto" posible.

El astrónomo inglés Arthur Stanley Eddington estuvo al frente de la expedición científica que en 1919 se desplazó a

África Occidental para observar el eclipse total de Sol. El principal objetivo de la expedición era efectuar medidas precisas de las posiciones de las estrellas próximas al borde del disco solar. La física de Newton también predice la desviación de la luz bajo la influencia de campos gravitacionales, pero las ecuaciones de Einstein predecían una deflexión de más o menos el doble. Según esto, podían presentarse tres posibles resultados:

1. Que no se observara ningún cambio en las posiciones de las estrellas.
2. Que la deflexión fuera próxima a la predicha por la física newtoniana.
3. Que la deflexión fuera próxima a la predicha por Einstein.

El primer resultado afectaría tanto a las ecuaciones de Newton como a las de la teoría de la relatividad general. El segundo reforzaría la mecánica de Newton y desacreditaría a



Einstein. El tercero daría la razón a Einstein. Según un chiste de la época, dos astrónomos de la expedición discuten las tres posibilidades.

«¿Y qué ocurrirá», dice uno de ellos, «si medimos una deflexión dos veces mayor que la predicha por Einstein?»

«Entonces», contesta el otro, «Eddington se volverá loco.»

Felizmente, la deflexión resultó ser próxima al valor predicho por Einstein. La publicidad que rodeó a esta espectacular confirmación de la relatividad general puso en contacto la teoría con el gran público. En la actualidad, los astrónomos se muestran un tanto escépticos acerca de los resultados de Eddington. Las dificultades inherentes en realizar medidas precisas de las posiciones de las estrellas durante un eclipse son mucho mayores que las que Eddington supuso, y han aparecido diferencias en los resultados obtenidos durante eclipses posteriores a 1919.

No es difícil entender las razones de estas discrepancias. Los instrumentos de medida deben transportarse hasta el lugar donde se produce el eclipse total. Éste suele ser algún lugar remoto: en medio del océano, en un desierto, en una región ártica o en una zona tropical pantanosa. Durante un eclipse, la temperatura del aire desciende bruscamente, causando cambios impredecibles en la refracción y alterando con ella las posiciones observadas de las estrellas. Las fotografías de referencia para comparar la distribución aparente de las estrellas en ausencia del Sol deben tomarse o bien en el mismo lugar muchos meses más tarde, cuando las condiciones atmosféricas han variado, o bien en el mismo momento, pero en observatorios de otras regiones. Sea como fuere, los resultados experimentales no son unánimes. Por otra parte, no hay que olvidar los prejuicios inconscientes de los astrónomos con ideas preconcebidas acerca de lo que esperan encontrar.

La teoría de Einstein predice una deflexión media de

1,75 segundos de arco para cada estrella. Dos mediciones en 1919 dieron deflexiones de 1,98 y 1,61, ambas verdaderamente cercanas al valor teórico. Sin embargo, la deflexión descendió hasta 1,18 en un experimento realizado en 1922 y subió hasta 2,24 en un experimento llevado a cabo en 1929. En 1962, en un congreso de la Royal Society de Londres, un grupo de científicos llegó a la conclusión de que las dificultades son tan grandes que sería mejor no intentar efectuar mediciones durante los eclipses totales de Sol. Sin embargo, en 1975 se comprobó la desviación gravitatoria de la luz con ondas de radio procedentes de un quasar. El experimento dio como resultado el valor predicho por Einstein con un error de únicamente el 1 %.

En 1979 se descubrió una doble imagen de un quasar (se sabe que las dos imágenes corresponden al mismo quasar porque sus dos espectros —sus carnets de identidad— coinciden exactamente) cuya mejor explicación sería la existencia de una gran galaxia entre el quasar y la Tierra que, haciendo las veces de una "lente gravitatoria", desviaría los rayos de luz. Desde entonces se han observado otros "quasars gemelos" (aproximadamente uno por año) que, según la opinión de la gran mayoría de los astrónomos, se deben al intenso campo gravitatorio de una galaxia que se encuentra en el camino de la luz procedente de los quasars.

A lo largo de los años setenta, se han llevado a cabo docenas de sofisticados experimentos que han corroborado la teoría de Einstein y han desacreditado a todas las teorías rivales. Ingenios espaciales orbitando alrededor del Sol han intercambiado señales de radio cuando se encontraban en una posición tal que las ondas pasaban muy cerca del Sol y podía medirse con precisión el retraso causado por su campo gravitatorio. Asimismo, se han llevado a cabo experimentos con señales de radar emitidas desde la Tierra que rebotan en la superficie de Mercurio y Venus y que a su regreso pasan muy

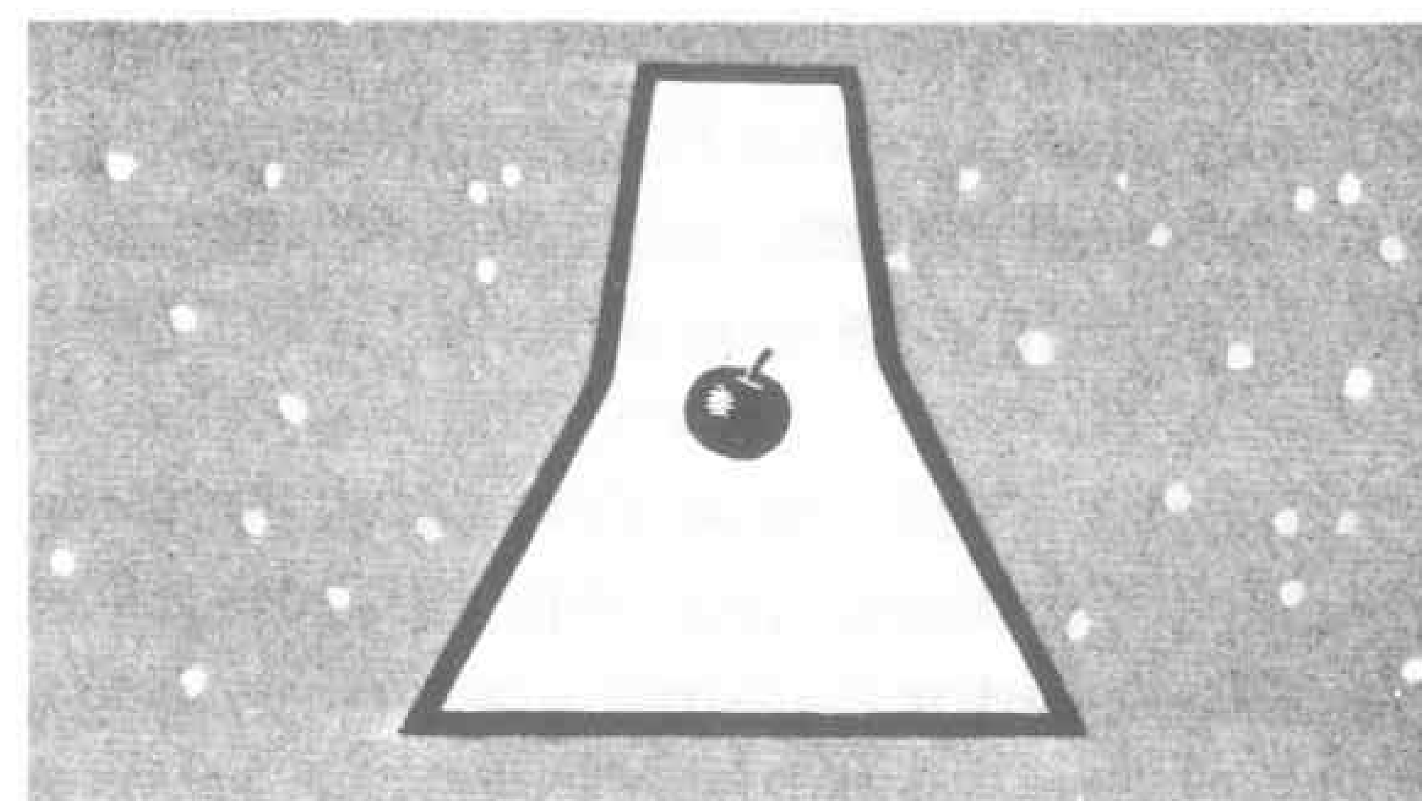
cerca del Sol. Incluso se han efectuado pruebas con emisiones de radio procedentes de quasars muy distantes (ver capítulo 11) que pasan muy cerca del borde del disco solar. Casi cada mes se llevan a cabo nuevas pruebas y la teoría de Einstein de la gravedad sale airosa de todas ellas.

Una de estas pruebas, publicada en 1976, se basaba en el viaje de ida y vuelta de rayos láser dirigidos a reflectores colocados por astronautas en la Luna. A partir de estos datos, se pueden obtener medidas extraordinariamente precisas del movimiento de la Luna. La teoría de Dicke predice una desviación de varios metros respecto a lo predicho por la relatividad general. No se pudo detectar ninguna diferencia con las ecuaciones de Einstein, dentro de los límites del error experimental (unos quince centímetros).

Una teoría científica no es muy potente si no hay experimentos capaces de refutarla de forma concluyente. El eminente físico de origen ruso, George Gamow, fallecido en 1968, describió un experimento tal relacionado con antipartículas*. En 1957, Philip Morrison y Thomas Gold conjeturaron que las antipartículas podían tener masa gravitatoria negativa. De ser así, cualquier fuerza gravitatoria que actuara sobre las mismas las aceleraría en la dirección opuesta. Una antimanzana hecha de antimateria ascendería al cielo en lugar de caer sobre la cabeza de Newton. Esta conjetura es atractiva, ya que, si fuera cierta, explicaría la ausencia de antimateria en nuestra galaxia. Cualquier tipo de antimateria que se hubiera producido en el pasado en la vecindad de la galaxia hubiera sido proyectado hacia fuera. Todavía no se ha podido determinar de manera inequívoca si las antipartículas tienen o no masa gravitatoria negativa, pero si se descubriera que la tienen, la teoría de la relatividad se vería en serias dificultades.

Para entender cuál es el problema, imaginemos una

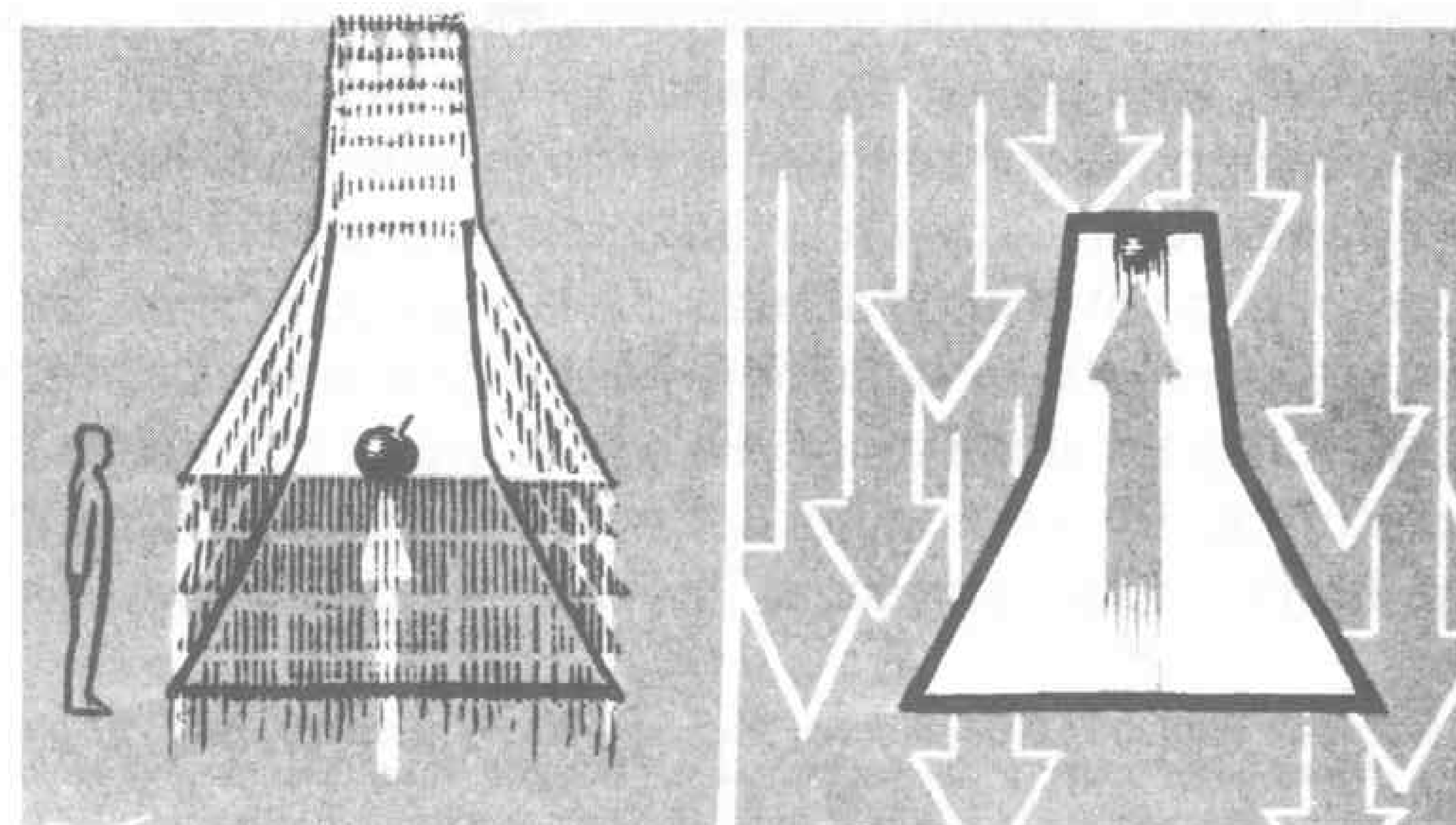
* Véase el artículo de Gamow, "Gravity", *Scientific American* (marzo, 1961).



nave espacial suspendida en el espacio interestelar, en reposo con respecto a las estrellas. Flotando en el interior del aparato se encuentra una solitaria antimanzana con masa gravitatoria negativa. La nave empieza a moverse en la dirección del techo con aceleración g (aceleración con la que caen los cuerpos sobre la Tierra en las proximidades de su superficie).

¿Qué le ocurre a la manzana?

Desde el punto de vista de un observador situado fuera de la nave, ligado al sistema de referencia inercial del Cosmos, la manzana debe permanecer exactamente donde estaba con respecto a las estrellas. No actúa ninguna fuerza sobre



ella, la nave no toca a la manzana. Es cierto que el suelo del compartimiento se moverá hacia arriba hasta encontrarse con la manzana, pero en este experimento ideal no nos importa lo que le ocurre a la manzana cuando el suelo la alcanza.

La situación es totalmente distinta si elegimos la nave como sistema fijo de referencia. Ahora el observador debe suponer que en el interior de la nave actúa un campo gravitatorio. Esto lanzará la manzana hacia el techo con una aceleración (relativa a las estrellas) de dos *g*. Se habrá violado un principio básico de la relatividad: los dos sistemas de referencia no serán intercambiables.

En otras palabras, es difícil reconciliar la masa gravitatoria negativa con la relatividad general, aunque aquélla encaja plenamente en el concepto de inercia que tenía Newton. La física clásica adopta simplemente el primer punto de vista. La nave tiene un movimiento absoluto con respecto al éter. La manzana permanece en reposo absoluto. Ningún campo gravitatorio viene a perturbar la escena.

Es importante darse cuenta de que en relatividad los problemas aparecen cuando un tipo de masa es positiva y la otra negativa. Un cuerpo con ambas masas negativas no da lugar a contradicciones, aunque su comportamiento puede ser sorprendente*. Una pelota de béisbol en movimiento hecha de antimateria podría ser atrapada con un guante de béisbol con sólo arrojarlo con fuerza en la dirección en que se mueve. Sin embargo, la pelota caería al suelo de la manera normal. En el caso de una pelota en caída libre hecha de materia ordinaria, la atracción gravitatoria entre ella y la Tierra se compensa por el arrastre de su masa inercial. En el caso de una bola que tenga las dos masas negativas, la *repulsión* gravitatoria entre

* Véanse los artículos de Herman Bondi, "Negative Mass in General Relativity", *Reviews of Modern Physics* (julio, 1957), y Banesh Hoffmann, "Negative Mass", *Science Journal* (abril, 1965).

la bola y la Tierra queda compensada por el *tirón* hacia la Tierra de su masa inercial. Por tanto, cae también con toda normalidad en el campo gravitatorio terrestre.

Supongamos que "masa positiva" significa que ambas masas (inercial y gravitatoria) son positivas y que "masa negativa" quiere decir que ambas masas son negativas. Una masa positiva atrae a los dos tipos de masas; una masa negativa, en cambio, repele a los dos. Si una estrella de masa positiva se encuentra en las proximidades de una estrella de masa negativa, la estrella positiva atraerá a la negativa y ésta repelerá a la positiva. En consecuencia, una estrella perseguirá a la otra, desplazándose en el espacio con aceleración constante. La estrella negativa ganará energía negativa al aumentar de velocidad; de no hacerlo, el sistema incrementaría su energía y violaría el principio de conservación de masa-energía.

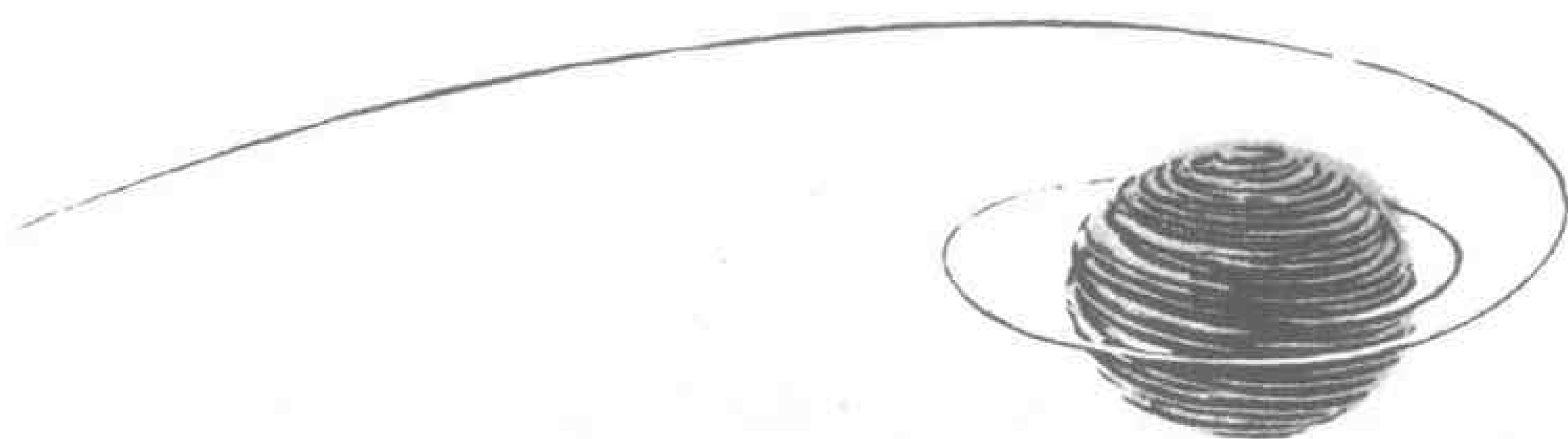
El descubrimiento de una partícula con masa inercial positiva y masa gravitatoria negativa sería, como hemos visto, algo totalmente distinto. Introduciría una contradicción que sería fatal para la relatividad general y nos obligaría a regresar a la concepción newtoniana de la inercia, entendiéndola como resultado de un movimiento absoluto con respecto a un espacio fijo. «El autor desea de todo corazón», concluye Gamow, «que esto no llegue a suceder.»

VIII. EL PRINCIPIO DE MACH

El principio de equivalencia de Einstein dice que cuando un objeto se acelera o gira se crea un campo de fuerzas que puede considerarse tanto inercial como gravitatorio, dependiendo de la elección del sistema de referencia. Pero entonces surge una pregunta de gran importancia; una pregunta que nos lleva rápidamente a profundos problemas todavía no resueltos.

¿Son estos campos de fuerza el resultado del movimiento con respecto a una estructura de espacio-tiempo que existe independientemente de la materia, o por el contrario esta estructura de espacio-tiempo está *creada* por la materia, es decir, creada por las galaxias y otros cuerpos materiales del Universo?

En este tema, la opinión de los expertos no es unánime. La vieja controversia de los siglos XVIII y XIX sobre si el "espacio" o el "éter" tienen o no existencia material independiente de la materia, está todavía latente entre nosotros, sólo que las discusiones, en la actualidad, giran sobre la estructura de espacio-tiempo (a veces se llama también el "campo métrico") del Cosmos. La mayoría de los primeros autores sobre relatividad —Arthur Stanley Eddington, Bertrand Russell, Alfred North Whitehead y otros— creían que la estructura era independiente de las estrellas, aunque, desde luego, sufre dis-

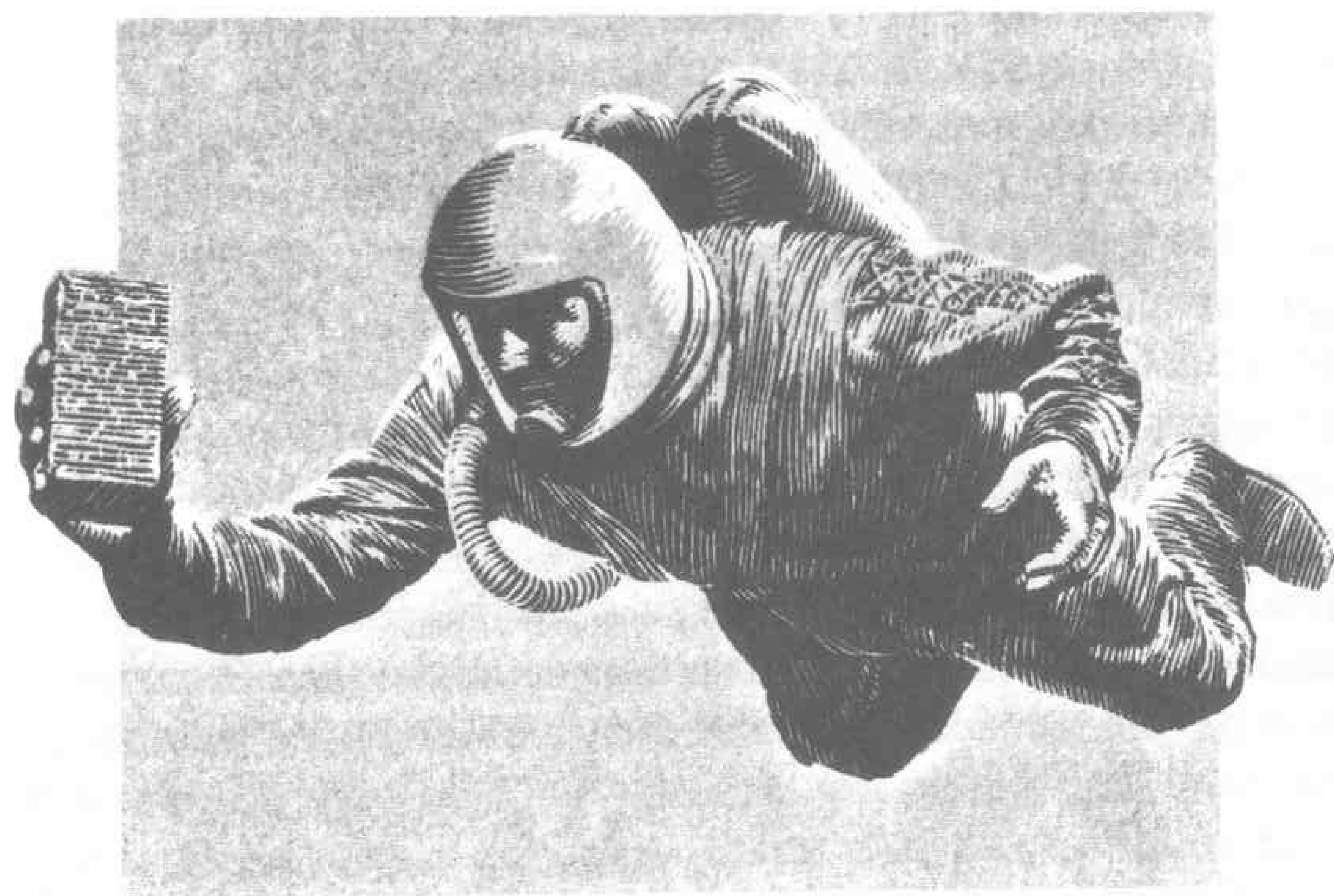


torsiones locales debido a la presencia de las mismas. En otras palabras, si no hubiera ningún otro objeto en el Cosmos excepto la Tierra, sería todavía posible, en su opinión, que la Tierra girara con respecto a esta estructura de espacio-tiempo (carece de importancia en esta discusión que esta estructura tenga una curvatura global positiva, negativa o nula). Una nave espacial solitaria, único objeto en el Universo, seguiría siendo capaz de poner en marcha sus motores y acelerar. Dentro de la nave, los astronautas continuarían experimentando las fuerzas inerciales de la aceleración. Una Tierra totalmente solitaria seguiría estando achatada por los polos. Se deformaría en el ecuador porque las partículas que la componen se verían forzadas a seguir líneas que no serían geodésicas en la estructura de espacio-tiempo. Las partículas irían (para entendernos) "a contrapelo" del espacio-tiempo. Sería incluso posible, en esta Tierra tan solitaria, medir un tipo de fuerza inercial, la denominada fuerza de Coriolis*, y determinar también la *orientación* del eje de rotación de la Tierra.

* Si un misil intercontinental vuela hacia el norte o hacia el sur, la rotación de la Tierra (de oeste a este) hace que el proyectil se desvíe hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. Este efecto inercial o fuerza ficticia se denomina fuerza de Coriolis, en honor de G. G. Coriolis, ingeniero francés de principios del siglo XIX que fue el primero en analizarlo completamente. La fuerza de Coriolis es de la mayor importancia en el movimiento de grandes masas de aire en la atmósfera y a ella se debe el hecho de que, en el hemisferio norte, los tornados y ciclones giren en sentido contrario a las agujas del reloj. También explica que, en el hemisferio norte, la orilla derecha de los ríos esté más erosionada que la izquierda, siempre y cuando fluyan en dirección norte-sur.

Einstein admitía la posible verdad de esta opinión, pero no la encontraba de su gusto (al menos en su juventud). Se mostraba más partidario de una idea propuesta por primera vez por el filósofo irlandés Berkeley. Berkeley mantenía que si la Tierra fuera el único cuerpo del Universo, no tendría ningún sentido decir que giraba. Durante el siglo XVII, el filósofo alemán Gottfried von Leibniz y el físico holandés Christian Huygens mantuvieron opiniones similares, pero quedó reservado a Ernst Mach (el físico austriaco mencionado en el capítulo 2) el mérito de apoyar esta tesis con una teoría científica plausible. Mach anticipó gran parte de la teoría de la relatividad, y el propio Einstein escribió sobre la gran inspiración que recibió de Mach. (No obstante, es triste añadir que Mach, en su vejez, cuando sus ideas habían sido incorporadas a la teoría de Einstein, se empeñó en rechazar la relatividad.)

Desde el punto de vista de Mach, un Cosmos sin estrellas no tendría ninguna estructura espaciotemporal con respecto a la cual la Tierra pudiera girar. Según Mach, para que existan campos gravitatorios (o inerciales) capaces de deformar el ecuador terrestre y derramar el agua de un cubo en rotación, deben existir estrellas que creen una estructura espaciotemporal. Sin esta estructura, el espacio-tiempo no poseería geodésicas. Ni siquiera se podría decir que un rayo de luz en el espacio completamente vacío viajara a lo largo de una geodésica, puesto que, en ausencia de una estructura espaciotemporal, la luz no sabría cómo escoger un camino en lugar de otro. No sabría por dónde ir, como dice el astrónomo A. d'Abro en su libro *The Evolution of Scientific Thought.* La misma existencia de un objeto esférico como la Tierra sería imposible. Las partículas materiales de que está hecha la Tierra se mantienen unidas debido a la gravedad, y la gravedad mueve a las partículas a lo largo de geodésicas. Sin ninguna estructura espaciotemporal ni geodésicas, la Tierra (según d'Abro) no sabría qué forma adoptar. Eddington lo



expresó en una ocasión de modo humorístico: en un Universo totalmente vacío (si Mach está en lo cierto) ¡los campos gravitatorios de Einstein se caerían al suelo!

D'Abro describe un experimento ideal que ayuda a clarificar la posición de Mach. Imaginemos un astronauta flotando en el espacio. En su mano sostiene un ladrillo. Vamos a suponer que no existe ningún otro objeto en el Universo. Sabemos que el ladrillo no tendrá peso (masa gravitacional). ¿Tendrá masa inercial? Si el astronauta intentara lanzar el ladrillo al espacio, ¿se resistiría al movimiento de su mano? Desde el punto de vista de Mach, es claro que no. Sin estrellas en el Cosmos que doten de un campo métrico al espacio-tiempo, no hay nada respecto a lo que pueda acelerarse el ladrillo. Existe el astronauta, pero su masa es tan pequeña que los efectos que causa son despreciables.

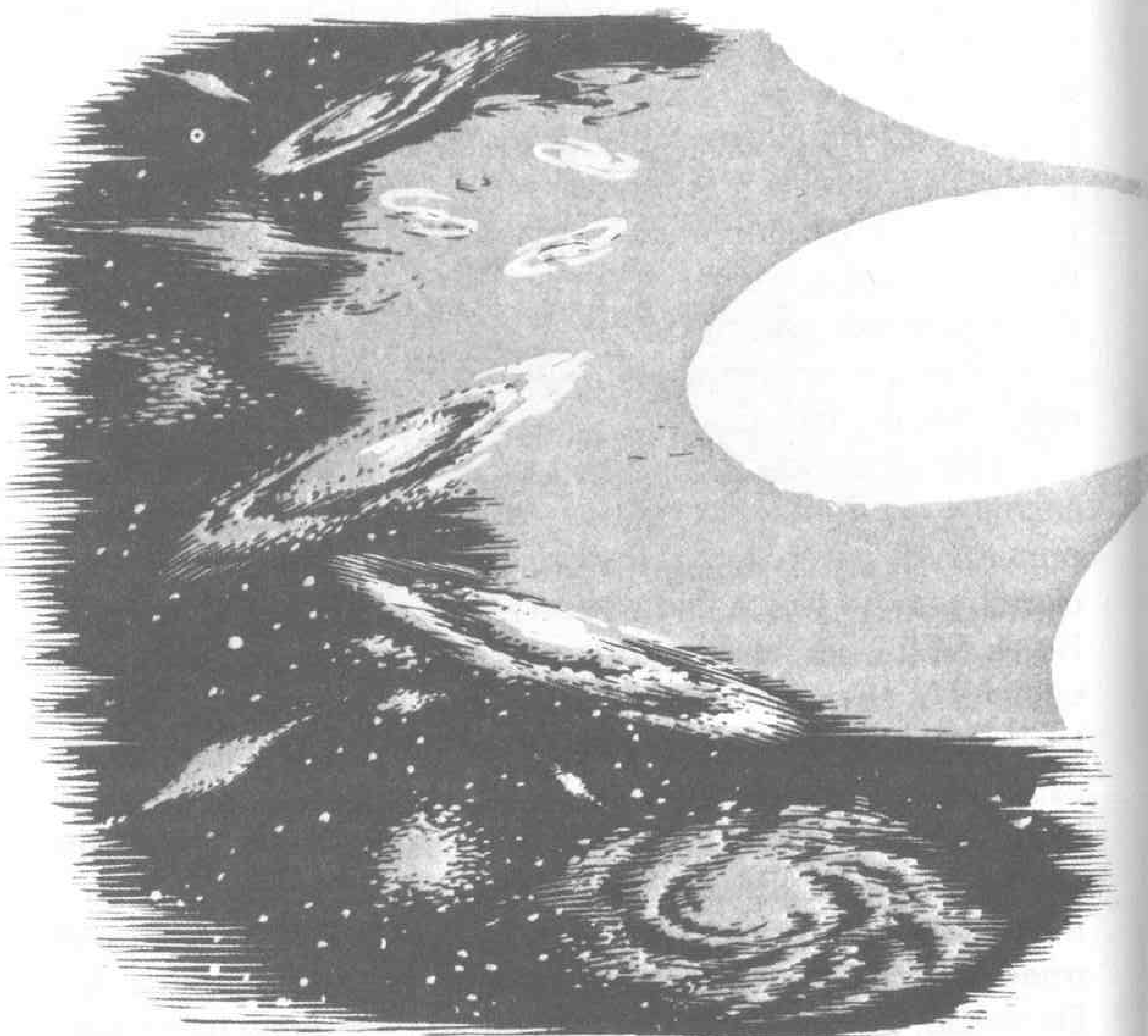
Einstein usó el término "principio de Mach" para referirse a la concepción de Mach. Al principio, Einstein tuvo la esperanza de que este principio pudiera incorporarse a la teoría de

la relatividad. De hecho, concibió un modelo del Universo (que será expuesto en el capítulo 10) en el cual la estructura espaciotemporal del Universo sólo existe en cuanto creada por las estrellas y otros cuerpos materiales. En 1917 Einstein publicó su primera descripción matemática de este modelo. Escribió: «En una teoría de la relatividad consistente, no puede haber inercia relativa al "espacio", sino únicamente inercia de unas masas con respecto a otras. Por tanto, la inercia de una masa que se encuentra a suficiente distancia de cualquier otra masa del Universo será cero.»

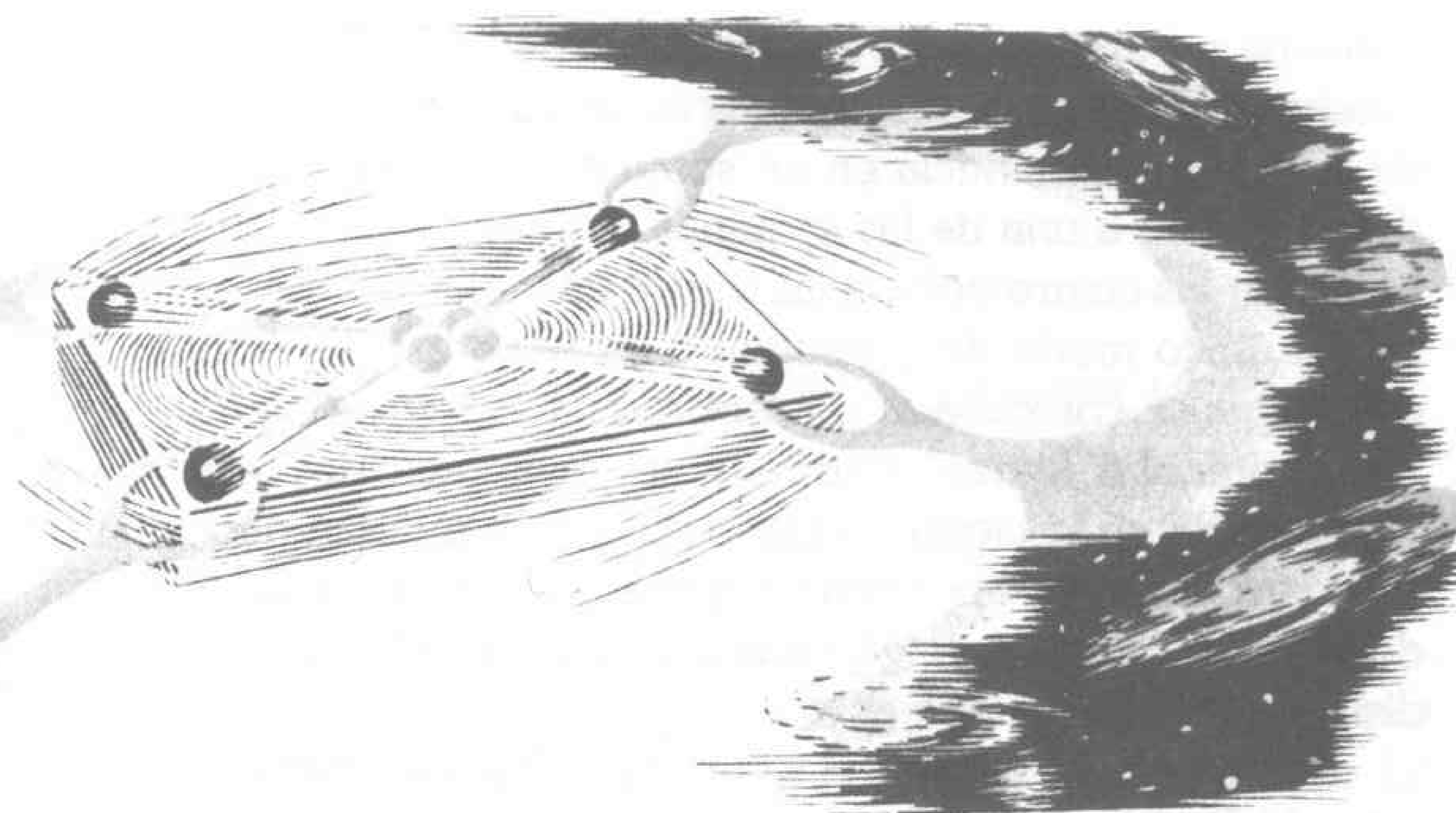
Más tarde se descubrieron serias lagunas en el modelo cósmico de Einstein y éste se vio obligado a abandonar el principio de Mach. Sin embargo, este principio continúa ejerciendo una poderosa fascinación en los cosmólogos de hoy*. No es difícil comprender por qué. Lleva la relatividad del movimiento a sus últimas consecuencias. La concepción opuesta, la que supone un espacio métrico incluso en ausencia de estrellas, está realmente muy cerca de la teoría del éter. En lugar de una gelatina invisible en reposo llamada éter, existe una estructura invisible de espacio-tiempo en reposo. Suponiendo que dicha estructura sea fija, las aceleraciones y las rotaciones toman un carácter absoluto bastante sospechoso. De hecho, los defensores de este punto de vista no han dudado en propugnar que las rotaciones y las aceleraciones son "absolutas". Por el contrario, si los efectos inerciales son relativos, no a una estructura tal sino a una estructura generada por las estrellas, se mantiene entonces una forma muy pura de relatividad.

El cosmólogo británico Dennis Sciama construyó una ingeniosa teoría en la línea de Mach. La presentó de un modo

* Para una excelente exposición de las actitudes actuales sobre el principio de Mach y de las diversas interpretaciones que se le han dado, véase el artículo de R. H. Dicke, "The Many Faces of Mach", en *Gravitation and Relativity*, editado por Hong-yee Chiu y William F. Hoffman (Nueva York: The Benjamin Co., 1964).



muy ameno en su popular libro *The Unity of the Universe.* De acuerdo con Sciama, los efectos inerciales debidos a la rotación o a la aceleración son el resultado de un movimiento relativo con respecto a la totalidad de la materia del Universo. Si esto es cierto, medir la inercia nos proporcionará un método de estimar la cantidad total de materia del Universo. Las ecuaciones de Sciama muestran que la influencia de las estrellas cercanas en la inercia es asombrosamente pequeña. Según él, todas las estrellas de nuestra galaxia contribuyen tan sólo en una diezmillonésima parte a la intensidad de la inercia



de la Tierra. La mayor parte de su intensidad proviene de la Contribución de galaxias distantes. Sciama estima que el 80 % de la fuerza inercial es el resultado del movimiento relativo a galaxias tan distantes que no han sido todavía descubiertas por nuestros telescopios.

En los días de Mach no se conocía la existencia de otras galaxias; tampoco se sabía que nuestra galaxia está girando. En la actualidad, los astrónomos saben que la fuerza centrífuga producida por la rotación hace que nuestra galaxia se deforme enormemente. Desde el punto de vista de Mach, esta deformación sólo puede ocurrir en el caso de que existan grandes cantidades de materia fuera de la galaxia. Si Mach hubiera estado al corriente del efecto inercial de rotación en nuestra galaxia, señala Sciama, hubiera sido capaz de predecir la existencia de otras galaxias cincuenta años antes de que se descubriera ninguna de ellas.

El carácter sorprendente de esta afirmación de Sciama se puede poner de manifiesto mediante la siguiente ilustración. Una vez tuve uno de estos pequeños juegos de habilidad que

consistía en una cajita de plástico transparente con una base cuadrada y cuatro bolitas metálicas en su interior. Cada una de las bolas permanecía en un surco que iba desde el centro del cuadrado a una de las esquinas. El juego consistía en hacer llegar las cuatro bolas a las cuatro esquinas al mismo tiempo. El único modo de conseguirlo era utilizando la siguiente estrategia: se colocaba la caja sobre una superficie plana y se hacía girar. La fuerza centrífuga se encargaba del resto. Si Sciama está en lo cierto, la razón de que se puedan depositar las cuatro bolas en las cuatro esquinas a la vez es la existencia de miles de millones de galaxias que se encuentran a enormes distancias de la nuestra.

No podemos saber si el futuro de la física tomará la dirección de las ideas de Mach o si, por el contrario, conservará una estructura absoluta de espacio-tiempo independiente de la materia y las ondas. Si se llega a desarrollar con éxito una teoría de campos en la que las partículas y los campos creados por ellas puedan explicarse en términos de una estructura espaciotemporal, entonces las estrellas pasarán a ser un mero aspecto de la geometría del espacio-tiempo. Las estrellas ya no generarán la estructura del espacio-tiempo, sino que estarán generadas por ella.

Éstos son problemas muy profundos. Los físicos están todavía muy lejos de resolverlos.

IX. LA PARADOJA DE LOS MELLIZOS

¿Cuál fue la reacción de los científicos y filósofos más importantes del mundo cuando empezaron a vislumbrar las primeras consecuencias de la teoría de la relatividad? La reacción fue diversa. La mayoría de los físicos y astrónomos, aturdidos por la violación del sentido común y las dificultades matemáticas que comportaba la teoría de la relatividad general, optaron por mantener un discreto silencio. Sin embargo, aquellos científicos y filósofos de espíritu más abierto que fueron capaces de llegar hasta el fondo de la teoría, la recibieron con los brazos abiertos. Ya hemos mencionado la rapidez con que Eddington se apercibió de la grandeza del descubrimiento de Einstein. Moritz Schlick, Bertrand Russell, Rudolf Carnap, Ernst Cassirer, Alfred North Whitehead, Hans Reichenbach y muchos otros filósofos eminentes que desde el principio se mostraron entusiastas defensores de la teoría, escribieron sobre la misma e intentaron esclarecer sus implicaciones. El libro de Russell *El ABC de la relatividad* (Ariel, Barcelona), publicado por primera vez en 1925, es todavía uno de los mejores libros de divulgación sobre la relatividad.

Muchos científicos fueron incapaces de desembarazarse de los esquemas mentales newtonianos. En cierto modo, se asemejaban a los científicos de los tiempos de Galileo que se negaban a admitir que Aristóteles hubiera estado equivo-

cado. El propio Michelson, matemático limitado, nunca llegó a aceptar la relatividad, a pesar de que su experimento allanó el camino para el advenimiento de la teoría. Todavía en 1935, cuando yo estudiaba en la Universidad de Chicago, seguí un curso de astronomía impartido por el profesor William D. Macmillan, un científico muy respetado que desdeñaba abiertamente la teoría de la relatividad.

«Los de nuestra generación somos demasiado impacientes para esperar», escribió Macmillan en 1927. «En el plazo de los cuarenta años transcurridos desde el fracaso de Michelson en detectar el movimiento de la Tierra con respecto al éter, hemos hecho borrón y cuenta nueva, introduciendo un postulado que afirma que de ningún modo se puede hacer tal cosa, y hemos construido una nueva mecánica no newtoniana que se adapte al postulado. El éxito que ha alcanzado es un maravilloso tributo a nuestra actividad intelectual y a nuestro ingenio, pero no estoy tan seguro de que sea también un tributo a nuestro buen juicio*.»

Toda clase de objeciones se alzaron en contra de la relatividad. Una de las primeras, y también de las más persistentes, se centraba en torno a una paradoja que ya había sido comentada por el propio Einstein en su primer artículo sobre la teoría de la relatividad, *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento,* publicado en 1905. (La palabra "paradoja" se usa en el sentido de algo contrario al sentido común, y no en el sentido de algo lógicamente contradictorio.) Esta paradoja sigue siendo actualidad científica, ya que los avances en los vuelos espaciales, junto con los espectaculares progresos en la construcción de dispositivos extraordinariamente precisos para medir el tiempo, pueden proporcionar en un futuro no demasiado lejano un medio de contrastar la paradoja de una manera directa.

* Extraído de la contribución de Macmillan a la obra *A Debate on the Theory of Relativity*, por Robert D. Carmichael y otros (La Salle, Ill.: Open Court Publishing Company, 1927).

La paradoja se describe usualmente como un experimento ideal con dos hermanos gemelos. Los gemelos sincronizan sus relojes en la Tierra y uno de ellos emprende un largo viaje espacial. A su regreso, los gemelos comparan sus relojes y se dan cuenta de que el gemelo que ha permanecido en la Tierra es un poco más viejo que el que se ha marchado. La teoría de la relatividad especial afirma que el reloj del gemelo viajero debe estar ligeramente atrasado respecto del de su hermano. En otras palabras, el tiempo en la nave espacial ha transcurrido más despacio que el tiempo en la Tierra. En la medida en que el viaje espacial se desarrolle dentro de nuestro Sistema Solar y a velocidades relativamente bajas, esta diferencia en los tiempos será inapreciable. Pero para mayores distancias y a velocidades próximas a la de la luz, la "dilatación del tiempo" (como se suele llamar) puede ser grande. No es inconcebible que se pueda llegar a conseguir algún día un medio de acelerar lentamente una nave espacial hasta que alcance una velocidad sólo un poco por debajo la de la luz. Esto haría posibles las visitas a otras estrellas de la galaxia y quizá incluso viajes a otras galaxias. De modo que la paradoja de los mellizos es algo más que una mera charla de café; algún día puede convertirse en una experiencia común de los viajeros del espacio.

Supongamos que el gemelo astronauta recorre una distancia de mil años luz y regresa. No es una gran distancia, si la comparamos con el diámetro de nuestra galaxia. ¿No morirá el astronauta mucho antes de que pueda completar el viaje? ¿No requerirá este viaje, como se explica en muchas novelas de ciencia ficción, una colonia entera de hombres y mujeres que se reproduzcan y mueran en el transcurso del largo viaje interestelar?

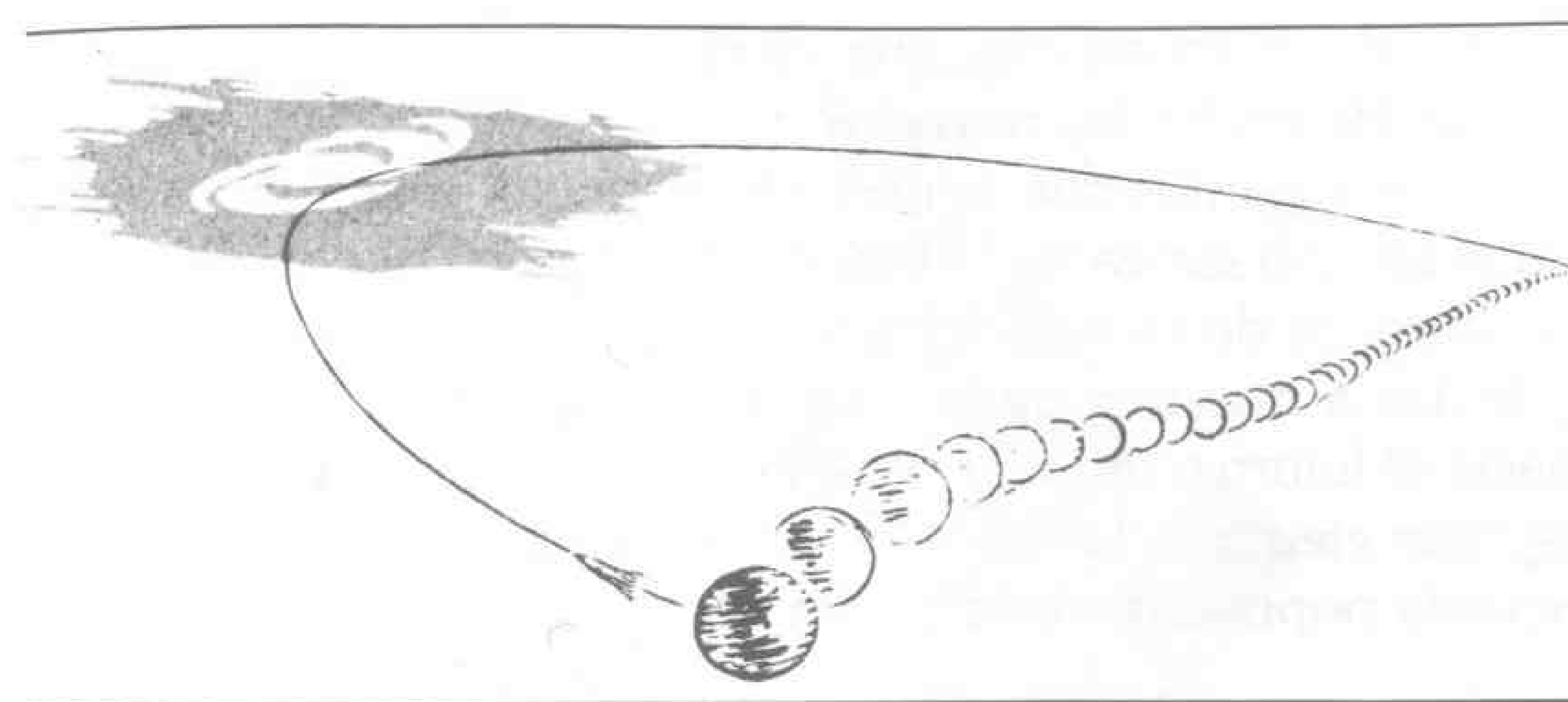
La respuesta depende de la velocidad de la nave. Si se desplaza a una velocidad muy próxima a la de la luz, el tiempo en el interior de la nave transcurre muy lentamente. Medi-

do en tiempo terrestre, el viaje tardará más de dos mil años en completarse. En cambio, el astronauta en el interior de la nave (suponiendo que viaje con suficiente rapidez), verá que no tarda más que unas cuantas décadas.

Para aquellos que gustan de cifras específicas, he aquí unos cálculos recientes realizados por Edwin M. McMillan, un físico nuclear de la Universidad de Berkeley. Imaginemos un astronauta que viaja desde la Tierra a la nebulosa espiral de Andrómeda. Vamos a suponer que la nebulosa se encuentra a 1,5 millones de años luz de la Tierra (estimación algo moderada; algunos científicos creen que se encuentra a casi 2 millones de años luz) y que la nave espacial viaja a una velocidad tal que para el astronauta que realiza el viaje transcurren cuarenta y cinco años desde su partida hasta el regreso a la Tierra. Cuando regresa, descubre que en la Tierra han transcurrido 3 millones de años.

(Advertencia: El lector debe considerar todas las referencias en este libro a viajes interestelares o intergalácticos, realizados a velocidades próximas a la de la luz, básicamente como experimentos ideales que intentan esclarecer determinados aspectos de la teoría de la relatividad. Para una explicación detallada de las enormes dificultades prácticas inherentes a la obtención de tales velocidades, véase la contribución de Edward Purcell en *Interstellar Communication,* editado por A. G. W. Cameron [Benjamin, 1963]. «Todas estas tonterías acerca de viajes espaciales alrededor del Universo con trajes espaciales», concluye Purcell, «excepto en el caso de exploraciones *locales,* de las que no he hablado, no son más que divagaciones delirantes.» Es posible.)

Pronto nos damos cuenta de que este efecto relativista abre toda una gama de fascinantes posibilidades. Por ejemplo, un científico de cuarenta años de edad y su joven ayudante de laboratorio de dieciocho años se enamoran. Se dan cuenta de que su diferencia de edad hace inviable cualquier



posibilidad de matrimonio. De modo que el científico se embarca en un viaje espacial a una velocidad cercana a la de la luz. Cuando regresa cuenta con cuarenta y un años de edad. Mientras tanto en la Tierra su novia se ha convertido en una mujer de treinta y tres años. Quizá no tuvo paciencia para esperar a que su amante regresara y se ha casado con otro. El científico no puede soportarlo. Se vuelve a embarcar en otro largo viaje. Además, quiere comprobar si cierta teoría que ha publicado será o no confirmada por posteriores generaciones. Regresa a la Tierra cuando cuenta cuarenta y dos años. Hace ya mucho tiempo que su novia ha fallecido. Y, lo que es peor, su preciosa teoría ha sido destrozada. Humillado, vuelve a embarcarse en un viaje todavía más largo, regresando al cumplir los cuarenta y cinco para ver cómo es el mundo mil años después. Quizá, como el viajero del tiempo de la narración de H. G. Wells *La máquina del tiempo,* descubrirá que la humanidad se ha convertido en algo obsoleto. Ahora se encuentra desamparado. La máquina del tiempo de Wells funcionaba en las dos direcciones, pero nuestro solitario científico no dispone de ningún medio para regresar a la corriente de la historia humana a la que pertenece.

Cuestiones morales poco corrientes aparecerían si este tipo de viaje en el tiempo fuera posible. Por ejemplo, ¿qué

habría de malo en que una chica se casara con su propio bis-bis-bis-bis-bis-bis-bisnieto?

Les rogamos que tengan presente que este tipo de viaje en el tiempo sortea las habituales trampas en que suelen caer las historias de ciencia-ficción, tales como regresar al pasado y matar a nuestros padres antes de que nazcamos, o irnos hacia el futuro y disparar contra nosotros mismos. Considérese, por ejemplo, la difícil situación de la señorita Bright en aquella popular quintilla humorística:

> «Una joven dama llamada Bright
> que correr más que la luz podía
> se marchó una mañana
> a la manera einsteiniana
> y a la noche anterior volvía*.»

Si regresó la noche anterior debió encontrarse con un doble de sí misma. De otro modo no sería la noche anterior. Pero durante la noche anterior no podían existir dos señoritas Bright, puesto que la señorita Bright que viajó en el tiempo se marchó sin registrar en su memoria que había visto a su doble. De modo que, como se puede ver, existe una clara contradicción. Un viaje en el tiempo de *esa* clase no es posible, a menos que se suponga la existencia de mundos paralelos que discurran a través de ramificaciones en el tiempo. Incluso con esta suposición las cosas se complican enormemente.

Nótese también que la forma einsteiniana de viajar en el tiempo no confiere al viajero ningún tipo de inmortalidad o de longevidad genuinas. En lo que a *él* se refiere, envejece al ritmo natural. Es sólo el "tiempo propio" de la Tierra el que parece esfumarse vertiginosamente a los ojos del viajero.

* Esta quintilla sobre miss Bright fue escrita por A. H. Reginald Buller, profesor de botánica en la Universidad de Manitoba, y se publicó por primera vez en *Punch*. La contradicción que se deriva del viaje al pasado de miss Bright se puede aplicar también a los "taquiones" (supuestas partículas más rápidas que la luz) si éstos se usan para transmitir señales. Véase mi artículo sobre viajes en el tiempo en *Scientific American* (mayo, 1974).



El famoso filósofo francés Henri Bergson fue quizás el pensador más destacado que polemizó con Einstein acerca de la paradoja de los mellizos. Escribió bastante sobre ella, riéndose de lo que, según él, eran absurdos lógicos. Desgraciadamente, lo que escribió sobre el tema demuestra que es posible ser un gran filósofo sin saber demasiadas matemáticas*. En los últimos años han vuelto a resurgir el mismo tipo de objeciones. El físico inglés Herbert Dingle es quien ha armado más alboroto al negarse a aceptar la paradoja. Durante

* El ataque de Bergson se encuentra en su libro *Durée et Simultanéité* (3.ª edición; París, 1926). En Estados Unidos los mismos ingenuos argumentos han sido sostenidos por los filósofos William Pepperell Montague y Arthur Oncken Lovejoy. Véase el artículo de Montague "The Einstein Theory and a Possible Alternative", *Philosophical Review*, Vol. 33 (marzo, 1924), páginas 143-170. (La alternativa de Montague es la hipótesis —los físicos la conocen como la teoría de emisión de Ritz— de que la luz *está* influida por el movimiento de la fuente que la emite; sus ataques contra Einstein muestran una sorprendente falta de comprensión de la teoría de la relatividad.) Para más detalles sobre el ataque de Lovejoy a la paradoja de los mellizos, véase "The Paradox of the Time-Retarding Journey, Part I", *Philosophical Review*, Vol. 40 (enero, 1931), páginas 48-68; la segunda parte apareció en el número de marzo y se encuentra en el mismo volumen, páginas 152-167. Lovejoy llega a la conclusión de que Bergson está en lo cierto: existen demasiados "tiempos ficticios", pero "únicamente un tiempo real". Evander Bradley McGilvary rebate a Lovejoy en el número de julio, páginas 358-379, pero Lovejoy, no convencido, vuelve a la carga en noviembre, páginas 549-567.

años ha venido escribiendo mordaces artículos sobre la misma y ha acusado a los otros expertos en relatividad de ser o bien obtusos o bien de escabullirse con evasivas. Es evidente que el análisis superficial que vamos a dar aquí no esclarecerá la controversia, que pronto se sume en complicadas ecuaciones, pero explicará de una manera general por qué existe este consenso universal entre los expertos de que la descripción de Einstein de la paradoja de los mellizos es correcta.

La objeción de Dingle, la más poderosa posible en contra de la paradoja, es la siguiente. De acuerdo con la teoría de la relatividad general, no hay ni movimiento absoluto ni sistemas de referencia "privilegiados". Siempre es posible elegir un objeto en movimiento como sistema de referencia sin violar ninguna ley de la naturaleza. Cuando se elige la Tierra como sistema de referencia, el astronauta realiza el largo viaje y al regresar encuentra que es más joven que el hermano que se ha quedado en casa. Todo correcto hasta aquí. Sin embargo, ¿qué sucederá si elegimos la nave como sistema de referencia? En este caso debemos suponer que es la Tierra la que emprende un largo viaje alejándose de la nave y regresando de nuevo. Ahora es el gemelo astronauta el que permanece en casa. Cuando la Tierra vuelve a encontrarse con la nave, ¿no deberá ser el gemelo terrestre el más joven? De ser así, la situación es algo más grave que una mera afrenta paradójica al sentido común; se trata de una contradicción lógica. Evidentemente, cada uno de los gemelos no puede ser más joven que el otro.

A Dingle le gusta presentar su conclusión del siguiente modo: O bien se admite que después del viaje la edad de los dos gemelos será exactamente la misma, o bien se rechaza la relatividad.

Sin necesidad de efectuar cálculo alguno, no es difícil entender por qué las alternativas no son tan drásticas como Dingle nos quiere hacer creer. Es cierto que todo movimiento

es relativo, pero en este caso existe una diferencia importante entre el movimiento relativo del gemelo astronauta y el movimiento relativo del que se queda en casa. *El gemelo que se queda en casa no se mueve respecto del Universo.*

¿Cómo afecta esto a la paradoja?

Supongamos que el astronauta se marcha para visitar el planeta X en algún lugar de la galaxia. Viaja a velocidad constante. El reloj del gemelo que se queda en casa está fijo al sistema de referencia ligado a la Tierra, todos los relojes del cual coinciden por encontrarse en reposo relativo entre sí. El reloj del astronauta se encuentra ligado a un sistema de referencia inercial distinto, el de la nave. Si la nave avanzara indefinidamente, no habría ninguna paradoja, puesto que entonces sería imposible comparar los dos relojes. Pero la nave debe detenerse y dar la vuelta en el planeta X. Cuando lo hace, pasa de un sistema de referencia inercial que se aleja de la Tierra a un sistema de referencia inercial que se acerca a la misma. Este cambio va acompañado de enormes fuerzas inerciales que actúan durante el intervalo de tiempo en que la nave frena y vuelve a acelerar al dar la vuelta. De hecho, si las aceleraciones durante el cambio de dirección fueran demasiado grandes, el astronauta (y no su hermano en la Tierra) moriría aplastado. Estas fuerzas inerciales aparecen porque el astronauta acelera con respecto al Universo. Estas fuerzas no actúan sobre la Tierra, puesto que la Tierra no sufre aceleraciones similares.

Desde un punto de vista se puede decir que las fuerzas inerciales creadas por estas aceleraciones "causan" un retraso del reloj del astronauta; desde un punto de vista distinto se puede decir que la aceleración indica simplemente un cambio de sistemas inerciales. Debido a este cambio, la línea de universo de la nave espacial —es decir, su trayectoria cuando se representa en el gráfico cuatridimensional de Minkowski del espacio-tiempo— se convierte en una trayectoria según la

cual el "tiempo propio" total del recorrido de ida y vuelta es menor que el tiempo propio total a lo largo de la línea de universo del gemelo que se ha quedado en casa*. Aunque se producen aceleraciones en el momento de cambiar de marcos inerciales, los cálculos pueden efectuarse utilizando simplemente las ecuaciones de la teoría especial de la relatividad, ya que el tiempo empleado en la maniobra de retroceso es despreciable en comparación al tiempo total empleado en el viaje.

Sin embargo, la objeción de Dingle sigue en pie, puesto que se pueden realizar exactamente los mismos cálculos suponiendo que el sistema fijo de referencia es la nave espacial y no la Tierra. Ahora será la Tierra la que se aleja, la que pasa de un sistema de referencia a otro y vuelve a regresar. ¿Por qué entonces los cálculos realizados no nos permitirán concluir que el tiempo en la Tierra ha transcurrido más lentamente? Es cierto que los cálculos darían los mismos resultados si no fuera por un hecho extraordinario: cuando la Tierra se aleja, *el Universo entero se aleja con ella.* Cuando la Tierra da la vuelta, el Universo entero también lo hace. Este Universo acelerado genera un poderoso campo gravitatorio. Como se ha explicado antes, la gravedad produce un efecto de retraso en los relojes. En el Sol, por ejemplo, un reloj iría más despacio que en la Tierra, y más despacio en la Tierra que en la Luna. Pero entonces, cuando se efectúan los cálculos adecuados, se descubre que el campo gravitatorio generado por el Cosmos acelerado retrasa los relojes de la nave espacial hasta que difieren de los relojes de la Tierra exactamente en el mismo valor que antes. Este campo gravitatorio no tiene, desde luego, ningún efecto sobre los relojes de la Tierra. La Tierra no se mueve relativamente al Cosmos; no existe, por tanto, ningún campo gravitatorio con respecto a la Tierra.

* Para un tratamiento matemático detallado, léase el excelente artículo "The Clock Paradox in Relativity Theory", de Alfred Schild, en *American Mathematical Monthly* (enero, 1959).

Quizá sea instructivo imaginar una situación en la que se producen las mismas diferencias de tiempo, aunque no intervengan aceleraciones. La nave espacial A pasa ante la Tierra a velocidad constante en su camino hacia el planeta X. En el momento de cruzar la Tierra pone su cronómetro a cero. La nave A sigue su camino hacia el planeta X, donde se encuentra con la nave espacial B, que se mueve con velocidad uniforme en la dirección opuesta. En el momento de cruzarse, A comunica por radio a B el tiempo transcurrido (medido por su propio reloj) desde que pasó por la Tierra. La nave B registra esta información y continúa avanzando a velocidad uniforme hacia la Tierra. Cuando pasa ante la Tierra, comunica por radio lo que tardó A en ir desde la Tierra hasta el planeta X y el tiempo que invirtió B (medido por su propio reloj) en ir desde el planeta X hasta la Tierra. La suma de estos dos períodos de tiempo será menor que el tiempo (medido por relojes en la Tierra) transcurrido desde que A pasó ante la Tierra hasta que B volvió a pasar ante ella.

Esta diferencia de tiempos puede calcularse por medio de las ecuaciones de la teoría de la relatividad especial. No aparecen aceleraciones de ninguna clase. Evidentemente, no cabe hablar ahora de paradoja de los mellizos, puesto que en este caso no existe un astronauta que se marche y regrese. Se podría suponer que el gemelo viajero se sube a la nave A, hace transbordo en el planeta X a la nave B y regresa, pero no existe ningún medio de hacer esto sin pasar de un sistema de referencia inercial a otro. Al efectuar el traslado sufriría fuerzas inerciales increíblemente intensas. Estas fuerzas delatan el cambio de sistema de referencia. Si se prefiere, se puede decir que las fuerzas inerciales retrasan su reloj. Sin embargo, si el episodio completo se contempla desde el punto de vista del gemelo viajero, eligiéndolo como sistema de referencia fijo, entonces entra en escena un cosmos movedizo que crea campos gravitatorios. (Una de las mayores fuentes de

confusión en la discusión de la paradoja de los mellizos proviene del hecho de que la situación se puede describir verbalmente de muchas maneras distintas.) Independientemente del punto de vista adoptado, las ecuaciones de la relatividad dan la misma diferencia de tiempos. Esta diferencia puede explicarse apelando únicamente a la teoría especial. Sólo para replicar a la objeción de Dingle es necesario recurrir a la teoría general.

No nos cansaremos de insistir en que no es correcto preguntarse "quién está en lo cierto": ¿Es el gemelo viajero quien se marcha y regresa, o es el gemelo terrestre y todo el Cosmos el que emprende el viaje de ida y vuelta? Hay *solamente* una situación: un movimiento relativo entre los dos gemelos. Se puede hablar de ello, sin embargo, de dos modos distintos. En un lenguaje, es el cambio de los sistemas inerciales a los que se encuentra ligado el astronauta (con sus fuerzas inerciales resultantes) lo que justifica la diferencia de edades. En otro lenguaje, son las fuerzas gravitatorias las que contrarrestan el efecto del cambio de sistema de referencia inercial por parte de la Tierra. *Desde los dos puntos de vista, el gemelo que se queda en la Tierra y el Cosmos no se mueven uno respecto del otro.* La situación, por tanto, es totalmente distinta para los dos hombres, aunque la relatividad del movimiento se respete. La diferencia de edades se explica de igual forma, prescindiendo de cuál de los dos gemelos es el que se considera en reposo. La teoría de la relatividad sale, pues, incólume de este ataque.

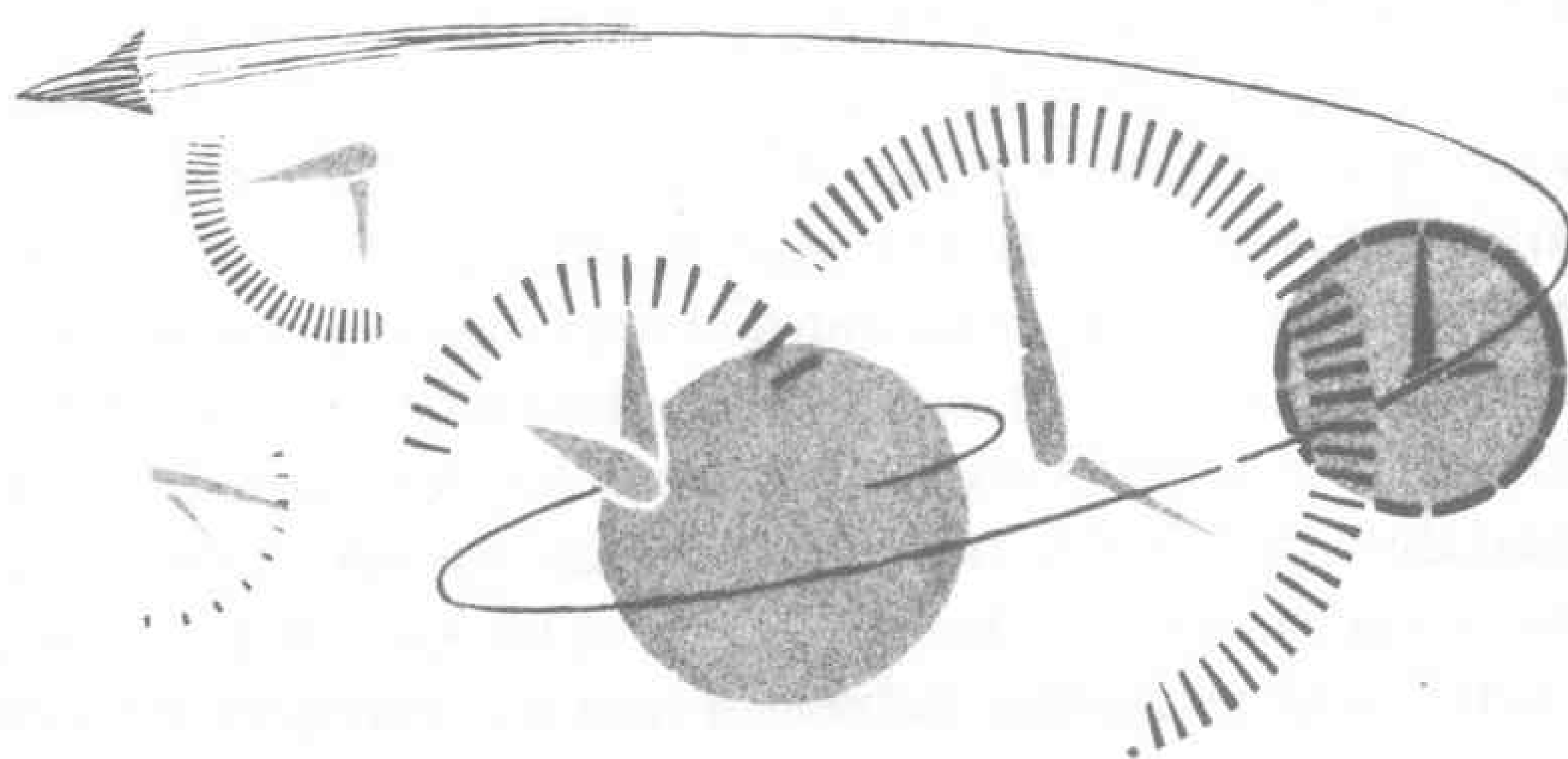
Es posible, sin embargo, plantear la siguiente interesante pregunta: ¿qué ocurriría si en el Cosmos no hubiera nada más que dos naves espaciales, A y B? La nave A pone en marcha sus motores, realiza un largo viaje y regresa. Los relojes de las dos naves, previamente sincronizados, ¿sufrirían el mismo cambio que antes?

La respuesta depende de que se adopte la concepción

de la inercia de Eddington o la concepción machiana de Dennis Sciama. Según Eddington, la respuesta es afirmativa. La nave A acelera con respecto a la estructura métrica del espacio-tiempo del Cosmos; la nave B no lo hace. La situación sigue siendo asimétrica y se vuelve a producir la misma diferencia de edades. Según Sciama, la respuesta es negativa. La aceleración carece de significado excepto con respecto a otros cuerpos materiales. En este caso los dos únicos cuerpos materiales son las dos naves espaciales. La situación es perfectamente simétrica. De hecho, no cabe hablar de sistemas de referencia inerciales debido a que no existe inercia (excepto una inercia extremadamente débil producto de la presencia de las dos naves que puede despreciarse). En un cosmos sin inercia es difícil predecir lo que iba a ocurrir cuando una de las naves espaciales pusiera en marcha sus motores. Como dice Sciama con fino humor británico: «La vida sería bastante distinta en un Universo de estas características.»

Dado que el retraso de los relojes del gemelo viajero puede considerarse como un efecto gravitatorio, cualquier experimento que muestre un retraso temporal a causa de la gravedad proporciona una confirmación indirecta de la paradoja de los mellizos. En años recientes se han producido varias de estas confirmaciones gracias a una maravillosa herramienta de laboratorio llamada el efecto Mössbauer*. En 1958, un joven físico alemán llamado Rudolf L. Mössbauer descubrió cómo hacer un "reloj nuclear" capaz de registrar tiempos increíblemente precisos. Imagínese un reloj que haga cinco "tics" cada segundo y otro reloj que marque un tiempo tan ajustado al del otro reloj que después de un billón de "tics" se ha retrasado respecto del primero tan sólo una décima de "tic". ¡El efecto Mössbauer es capaz de detectar inmediata-

* Véase el artículo de Sergio DeBenedetti, "The Mössbauer Effect", *Scientific American* (marzo, 1960).



mente que el segundo reloj está atrasado respecto del primero! Experimentos con el efecto Mössbauer han mostrado que el tiempo en la base de un edificio (donde la gravedad es mayor) corre un poco más despacio que el tiempo en la azotea del mismo edificio. «Una mecanógrafa que trabaje en el primer piso del Empire State Building», señala Gamow, «envejecerá más despacio que su hermana gemela que trabaje en el último piso.» La diferencia de edades será, por descontado, infinitesimal; no obstante, se trata de algo real que puede medirse.

Con ayuda del efecto Mössbauer, los físicos también han descubierto que un reloj nuclear se atrasa un poquito cuando se coloca cerca del borde de un disco pequeño (de unos 18 cm de diámetro) que se hace girar muy rápidamente. El reloj giratorio se puede comparar al gemelo viajero que sufre constantes cambios de sistemas de referencia inerciales (o alternativamente, al gemelo afectado por un campo gravitatorio, si se considera que el disco está en reposo y el Cosmos gira), lo cual proporciona una excelente verificación de la paradoja de los mellizos. El efecto de los mellizos

aparece también de manera evidente comparando el ritmo al que envejecen los muones sometidos a campos magnéticos que siguen trayectorias circulares con el ritmo de envejecimiento de muones que "se quedan en casa". Los primeros envejecen mucho más despacio.

Una prueba más directa la realizaron en 1971 Joseph Hafale y Richard Keating. Hicieron transportar cuatro relojes atómicos en reactores comerciales que daban la vuelta completa alrededor de la Tierra, primero en dirección este y después en dirección oeste. El avión que volaba hacia el este se movía con mayor rapidez (respecto del Universo) que el avión que volaba hacia el oeste. Comparándolos con un reloj de referencia situado en Washington, los relojes viajeros se comportaron tal como se esperaba de acuerdo con la teoría de la relatividad, es decir, perdieron tiempo en el viaje hacia el este y ganaron tiempo en el viaje hacia el oeste. La revista *Scientific American* (septiembre, 1972) dijo que ésta era la verificación más barata nunca realizada de la relatividad. Costó unos 8.000 dólares, de los cuales 7.600 se invirtieron en billetes de avión.

No está muy lejano el tiempo en que un astronauta pueda realizar la prueba definitiva, llevándose consigo un reloj nuclear en el curso de un largo viaje espacial. Ningún físico pone en duda, excepto el profesor Dingle*, que a su regreso el reloj del astronauta estará ligeramente desfasado con respecto a un reloj nuclear que se haya dejado en casa.

---

* Bien, no exactamente. Dingle cuenta todavía con varios partidarios. Una divertida historia de la controversia, considerando todos los puntos de vista y proporcionando 305 referencias, se encuentra en el libro de L. Marder *Time and the Space-Traveller* (University of Pennsylvania Press, 1974). Dingle murió en 1978 a la edad de 88 años. Estaba persuadido de que *toda* la teoría de la relatividad es falsa, tanto la especial como la general. Véase su obra *Science at the Crossroads*, publicada por International Pub. Service, 1974.

También Mendel Sachs, físico de la Universidad del Estado de Nueva York, en Buffalo, aborda la paradoja de los mellizos con la más extraña de las proposiciones. Sachs acepta la teoría de la relatividad, pero está convencido de que Einstein cometió un error al pensar que sus ecuaciones predecían la paradoja de los mellizos. Sachs ha llegado a referirse a la paradoja como "el escándalo de la física del siglo XX", y como un ejemplo de "anticiencia" comparable a la astrología.

X. MODELOS COSMOLÓGICOS

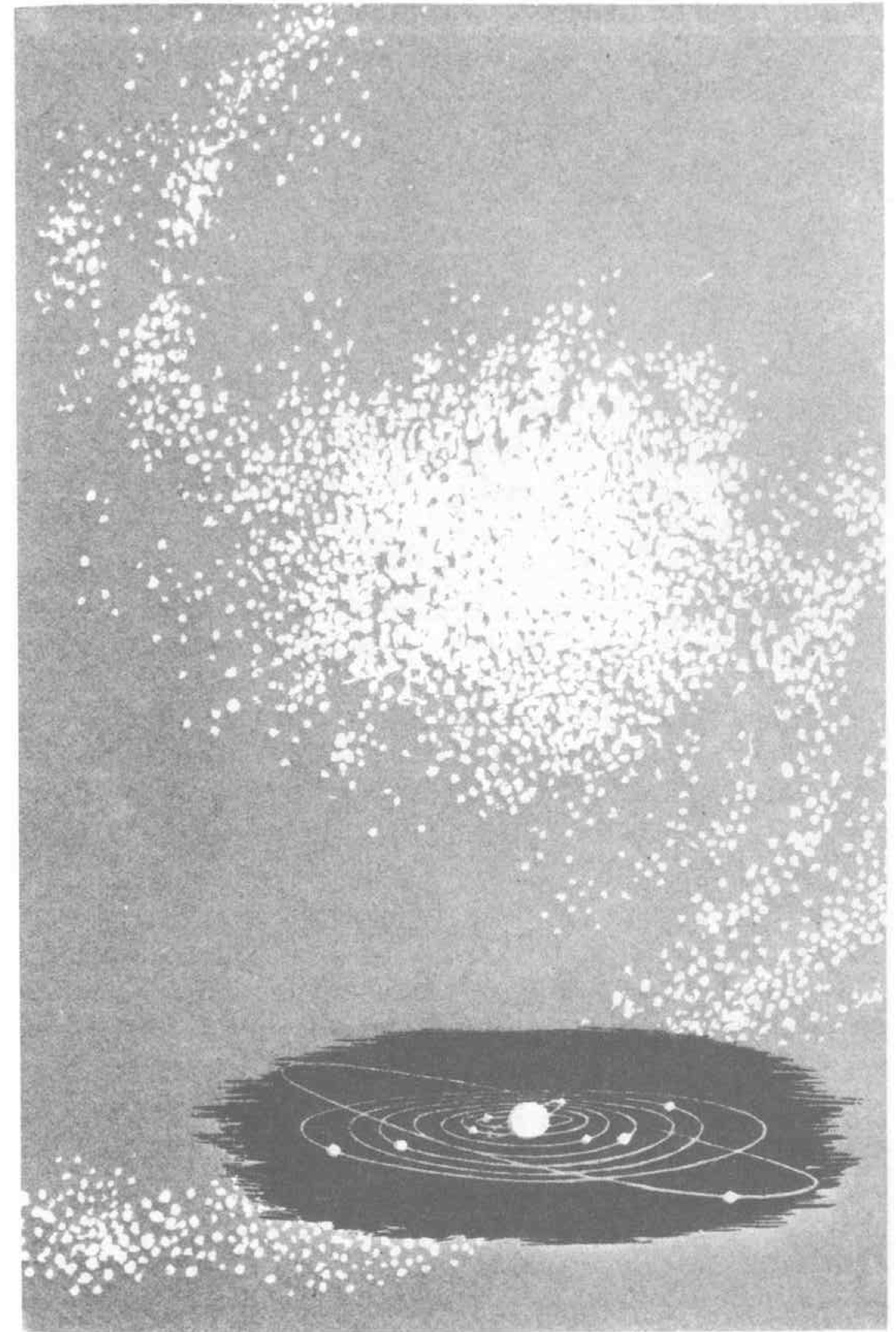
En este capítulo dejamos atrás los aspectos sólidos de la teoría de la relatividad sobre los que existe un amplio consenso y nos adentramos en una nebulosa región donde domina la más apasionada de las controversias: una región donde los puntos de vista no son más que sugerencias que deben aceptarse o rechazarse sobre la base de datos que la ciencia todavía no posee. ¿Cómo es el Universo como un todo? Sabemos que la Tierra es el tercer planeta, contando desde el Sol, en un sistema de nueve planetas. Sabemos que el Sol es una de los cientos de miles de millones de estrellas que pueblan nuestra galaxia. Sabemos que hasta donde los más potentes telescopios nos permiten sondear, el espacio está repleto de otras galaxias, galaxias que se pueden contar por miles de millones. ¿Debemos seguir indefinidamente? ¿Existe un número infinito de galaxias? O, ¿tiene el Cosmos un tamaño finito?

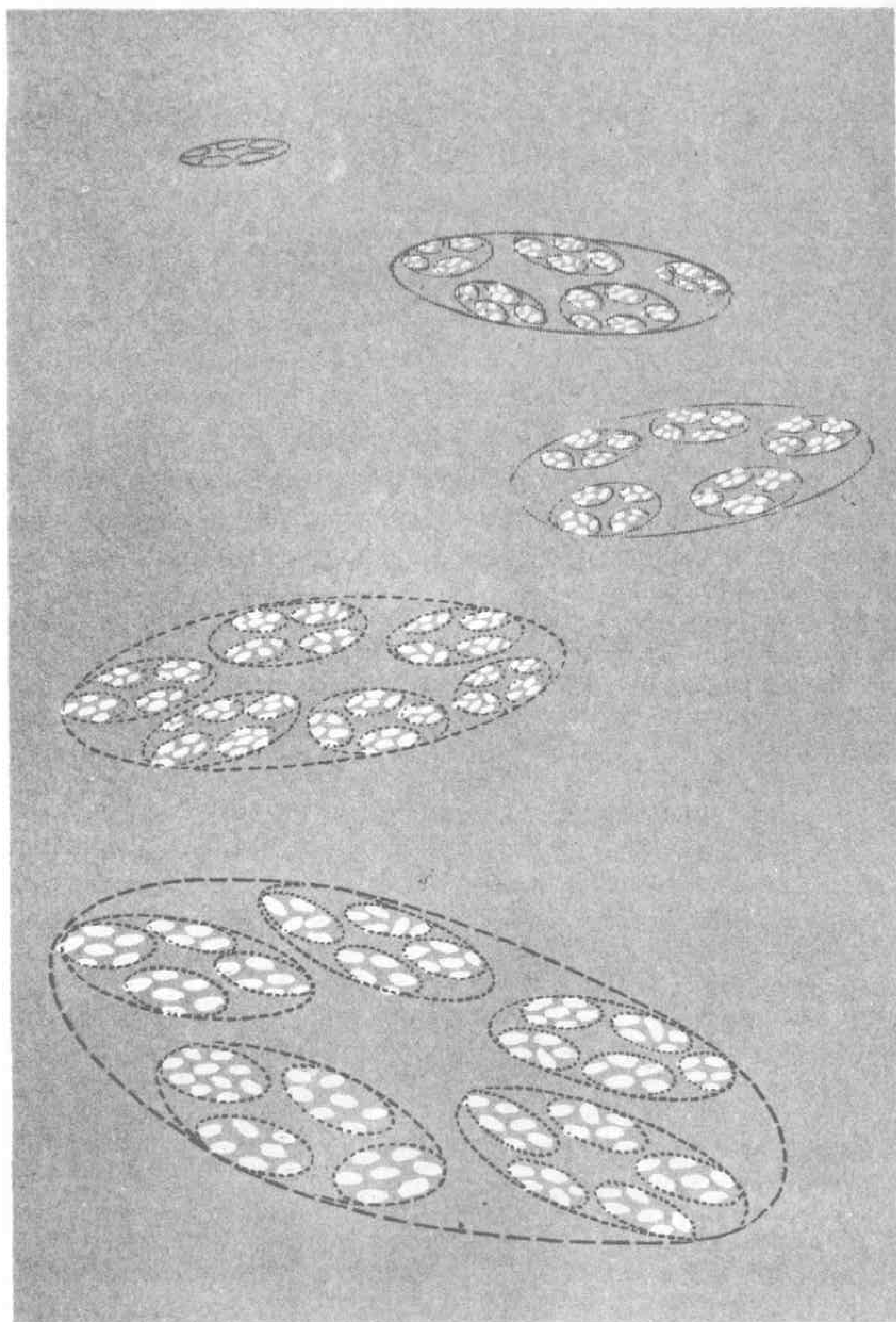
Los astrónomos intentan responder a estas preguntas lo mejor que pueden construyendo lo que llaman modelos cosmológicos: esquemas imaginarios de lo que es el Cosmos cuando se contempla en su totalidad. A principios del siglo XIX muchos astrónomos daban por supuesto que el Universo se extendía indefinidamente y que contenía un número infinito de estrellas. El espacio era euclídeo. Las líneas rectas

se podían extender hasta el infinito en todas direcciones. Si una nave espacial emprendía un viaje en cualquier dirección y continuaba en línea recta, seguiría avanzando indefinidamente sin encontrar nunca un borde o final. Ésta, desde luego, es una idea que ya aceptaban los antiguos griegos. Les gustaba decir que aunque un guerrero arrojara su lanza cada vez más lejos, nunca llegaría a un final; si pudiera imaginarse este final, se podría imaginar también que el guerrero se colocaba en aquel punto y arrojaba la lanza todavía más lejos.

Se puede hacer una importante objeción a esta idea. El astrónomo alemán Heinrich Olbers señaló en 1826 que si el número de estrellas es infinito y si éstas se encuentran uniformemente distribuidas en el espacio, entonces cualquier línea recta trazada desde la Tierra en cualquier dirección interceptará tarde o temprano una estrella. Pero entonces de noche todo el cielo debería estar iluminado por el brillo cegador de la luz estelar. Y no lo está. Esto se conoce con el nombre de paradoja de Olbers. La mayoría de los astrónomos de finales del siglo pasado y principios del siglo actual la explicaban afirmando que el número total de estrellas en el Universo es finito. Nuestra galaxia, decían, contiene todas las estrellas que existen. ¿Qué hay fuera de nuestra galaxia? ¡Nada! (De hecho, hasta la década de 1920 no se puso de manifiesto que existen millones de galaxias a enormes distancias de la nuestra.) Otros astrónomos sugirieron que la luz de las estrellas distantes podría quedar bloqueada por grandes masas de polvo interestelar.

La explicación más convincente la dio el matemático sueco C. V. L. Charlier. Las galaxias, según él, se encuentran agrupadas en cúmulos. Estos cúmulos, especuló, se encuentran agrupados a su vez en supercúmulos, los supercúmulos en supersupercúmulos, y así hasta el infinito. En cada paso hacia un nivel de agrupación superior, las distancias entre los grupos aumentarían proporcionalmente a su tamaño. Pero

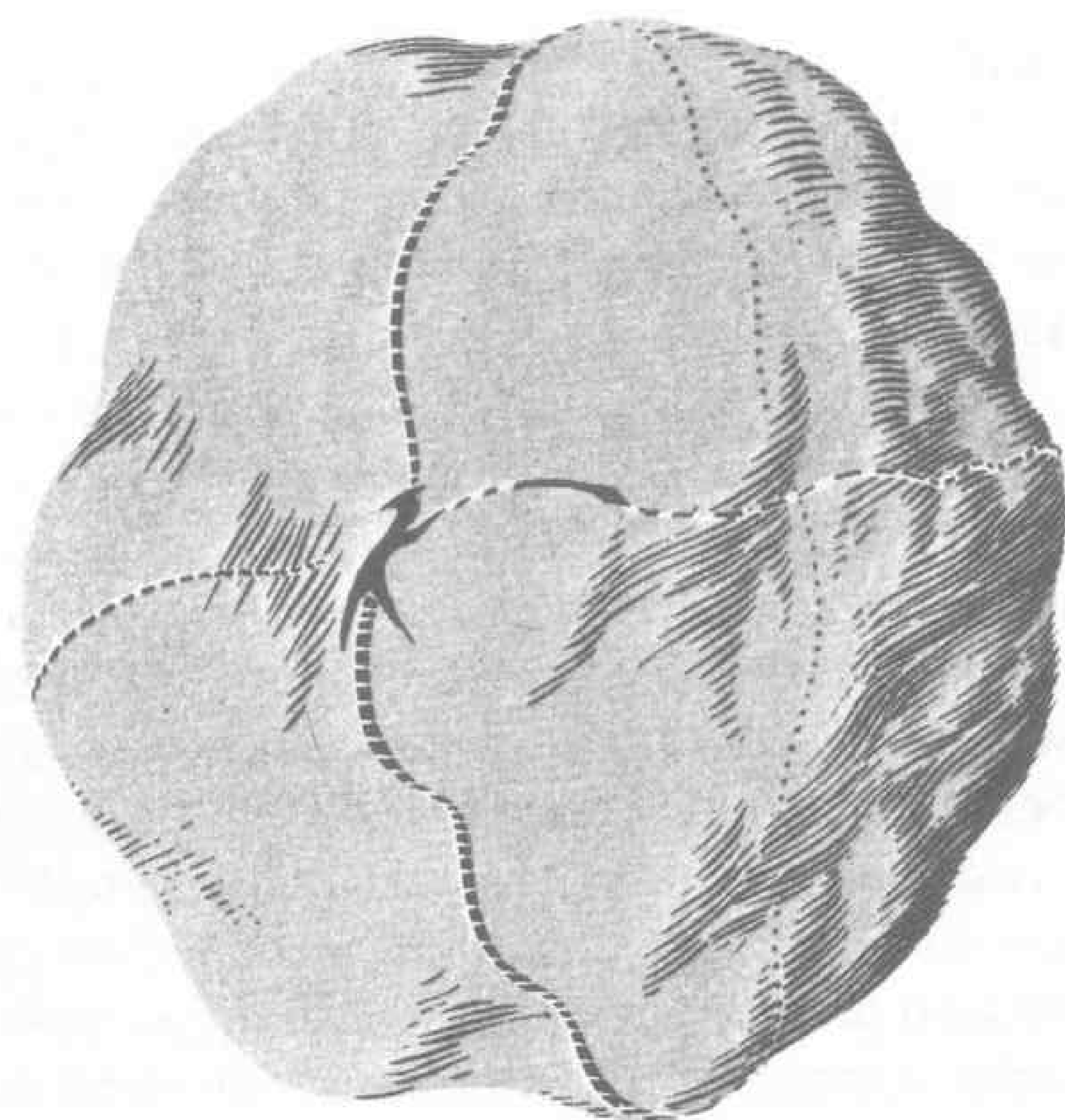




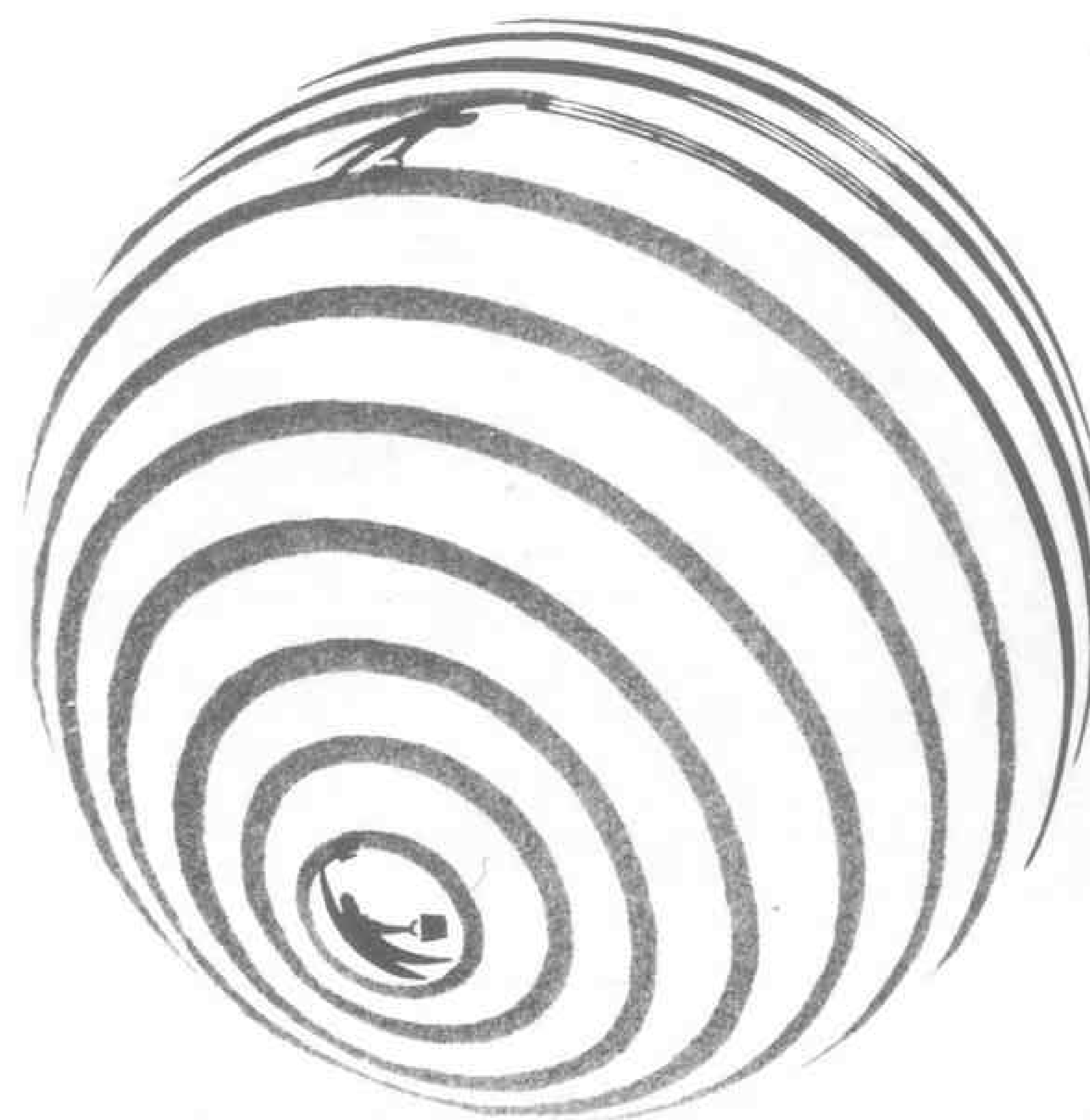
entonces, cuanto más se alejara una línea recta de nuestra galaxia, menor sería la probabilidad de que encontrara otra galaxia. Por otro lado, la jerarquía de cúmulos nunca se termina, de manera que, de acuerdo con esta teoría, se puede afirmar que el Universo contiene un número infinito de estrellas. No hay nada incoherente en la explicación de Charlier de la paradoja de Olbers. Sin embargo, ésta admite la explicación más sencilla que damos a continuación.

El primer modelo cosmológico basado en la teoría de la relatividad lo propuso el propio Einstein en un artículo publicado en 1917. Es un modelo elegante y de gran belleza que Einstein se vio obligado más tarde a abandonar. Como vimos anteriormente, los campos gravitacionales son distorsiones o curvaturas de la estructura del espacio-tiempo producidas por la presencia de grandes masas de materia. Así, en cada galaxia se producen grandes curvaturas y deformaciones del continuo espaciotemporal. Pero, ¿qué se puede decir de las vastas regiones de espacio vacío que hay entre las galaxias? Una respuesta es que cuanto más alejados estemos de las galaxias, más plano (más euclídeo) será el espacio. Si el Universo estuviera totalmente vacío de todo tipo de materia, sería completamente plano, o quizá carecería de sentido decir que este espacio tuviera algún tipo de estructura. En cualquier caso, el Universo se extiende hacia el infinito en todas direcciones.

Einstein hizo otra propuesta. Supongamos, dijo, que la cantidad total de materia en el Universo es suficientemente grande como para producir una curvatura global positiva. El espacio, entonces, se curvaría sobre sí mismo en todas direcciones. Esto no puede entenderse totalmente sin entrar en detalles de geometría no euclídea cuatridimensional, pero podemos hacernos una buena idea con la ayuda de un modelo bidimensional. Pensemos en Planilandia, un mundo plano donde viven criaturas de dos dimensiones. Ellos piensan que su mundo es un plano euclídeo que se extiende hasta el infini-



to en todas direcciones. Es cierto que las estrellas de Planilandia producirán protuberancias localizadas, pero éstas no afectarán su condición plana global. Ahora bien, los astrónomos de Planilandia pueden concebir una segunda posibilidad: quizá cada una de las protuberancias locales produce una ligera deformación local de todo el plano, de modo que el efecto total de las estrellas es curvar el plano hasta convertirlo en la superficie de una esfera abollada. Un plano de estas características seguiría siendo ilimitado en el sentido de que las criaturas de Planilandia podrían avanzar siempre en una dirección sin que nunca llegaran a un borde o límite. Un guerrero seguiría siendo incapaz de encontrar un lugar más allá del cual no pudiera arrojar su lanza. A pesar de ello, la superficie sería finita. Un viaje en "línea recta" durante un tiempo suficiente llevaría al viajero al punto exacto de partida.

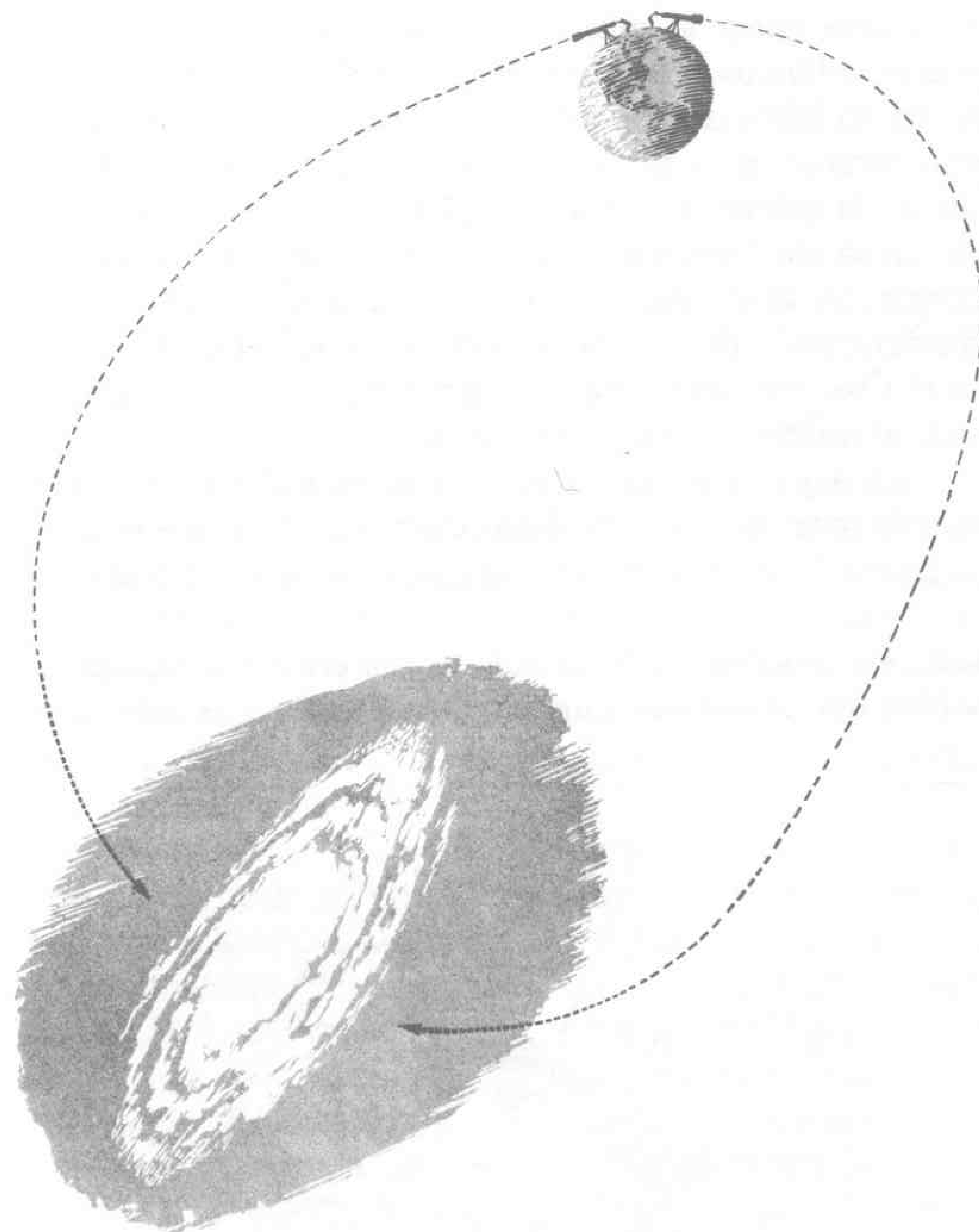


Los matemáticos dicen que una superficie de estas características es "cerrada". Es finita, pero ilimitada. Al igual que en el caso del plano euclídeo, su centro está en todas partes y su circunferencia (el borde) en ninguna. Esta propiedad topológica de "cierre" de la superficie es una propiedad que las criaturas de Planilandia podrían verificar fácilmente. Una de las pruebas ya ha sido mencionada: dar vueltas alrededor de la esfera en todas direcciones. Otra prueba podría consistir en pintar la superficie. Si un habitante de Planilandia empezara a pintar círculos concéntricos cada vez mayores desde un determinado lugar, terminaría pintándose a sí mismo en un lugar del lado opuesto de la esfera. Sin embargo, si la esfera fuera muy grande y los planilandeses estuvieran confinados en una pequeña región de su superficie, serían totalmente incapaces de llevar a cabo tales pruebas topológicas.



Einstein sugirió que nuestro espacio es la "superficie" tridimensional de una vasta hiperesfera (esfera cuatridimensional). El tiempo, en este modelo, permanece indeformado: su eje es una recta que se extiende desde un pasado infinito hasta un futuro infinito. Si el modelo se visualiza como una estructura espaciotemporal de cuatro dimensiones, se parece mucho más a un hipercilindro que a una hiperesfera. Por esta razón, el modelo se llama a menudo "Universo cilíndrico". En cualquier instante vemos el espacio como una especie de sección tridimensional del hipercilindro. Cada una de estas secciones transversales es la superficie de una hiperesfera.

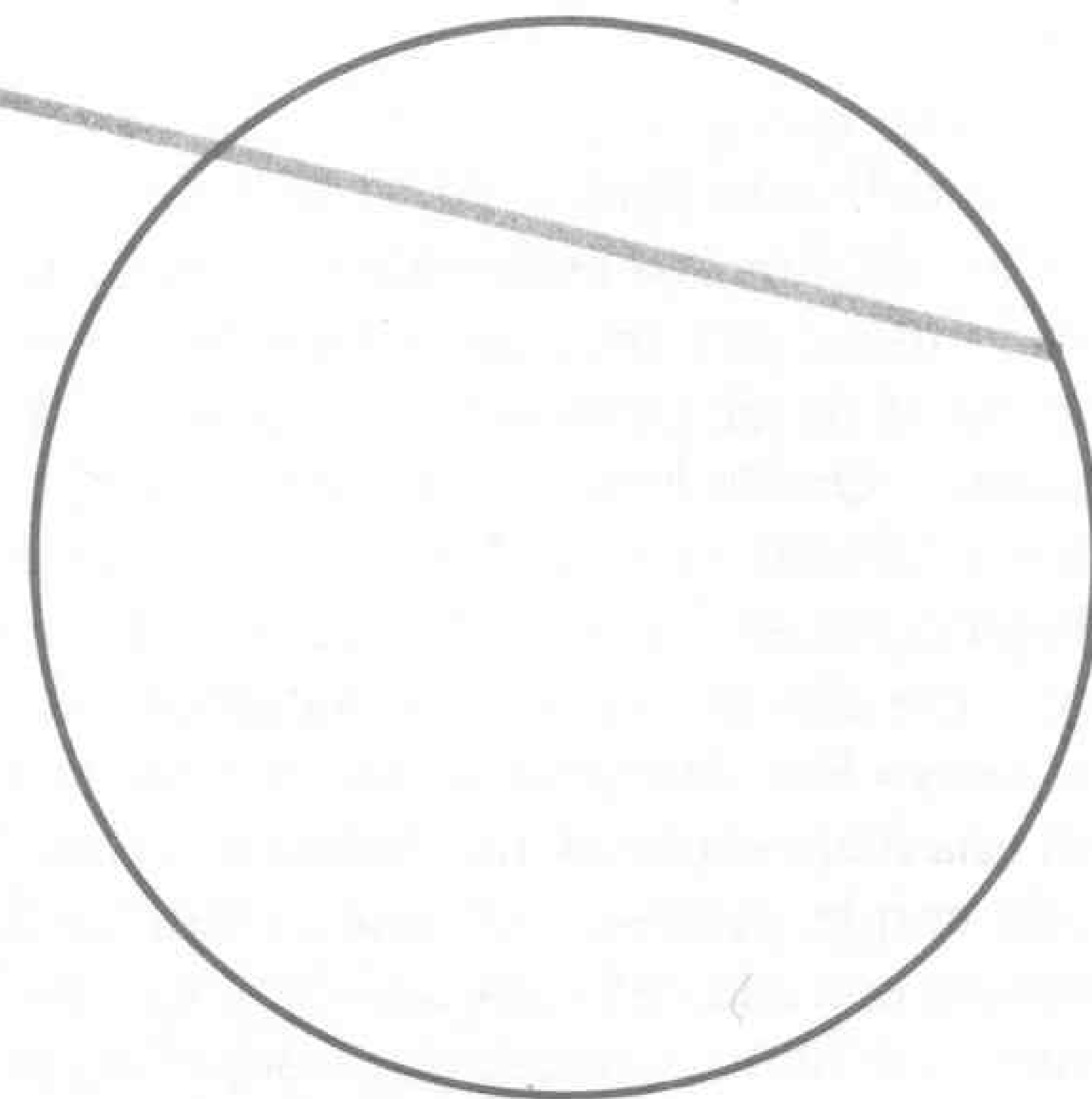
Nuestra galaxia ocupa solamente una minúscula porción de esta superficie, de manera que no es posible todavía llevar a cabo un experimento topológico que demuestre que esta superficie es cerrada. Un telescopio suficientemente potente podría enfocarse en una dirección hacia una cierta galaxia y luego hacia la *parte posterior* de la misma galaxia apuntándolo en la dirección opuesta. Si existieran naves espaciales ca-



paces de viajar a velocidades próximas a la de la luz, serían capaces de dar la vuelta al Cosmos moviéndose en la misma dirección y siguiendo siempre el camino más recto posible. El Cosmos no puede "pintarse" literalmente, pero esencialmente se podría hacer lo mismo levantando mapas, haciendo los mapas esféricos cada vez más grandes. Si el cartógrafo continuara su labor durante un tiempo suficiente, podría llegar a encontrarse en un punto a partir del cual pasaría a estar *dentro* de la esfera de la cual estaba levantando el plano. Esta esfera se iría haciendo cada vez más pequeña a medida que continuara avanzando, del mismo modo que los círculos van disminuyendo de tamaño a medida que el habitante de Planilandia va pintando sobre sí mismo hasta que prácticamente sólo le queda un punto por pintar.

En algunos aspectos, el modelo no euclídeo de Einstein es más sencillo que el modelo clásico según el cual el espacio es plano. Es más sencillo en el mismo sentido en que se puede considerar un círculo más sencillo que una recta. Una línea recta se extiende hasta el infinito por ambos extremos, y es sabido que el infinito es un tema matemático bastante complicado. Un círculo es tranquilizadoramente finito. No tiene extremos. Nadie tiene por qué preocuparse de lo que le ocurre a la línea en el infinito. De modo semejante, en el ordenado Universo de Einstein nadie debe preocuparse por las siempre imprecisas condiciones en el infinito, lo que los matemáticos suelen llamar también "condiciones de contorno". En el Universo de Einstein los bordes no plantean problemas sencillamente porque no hay bordes.



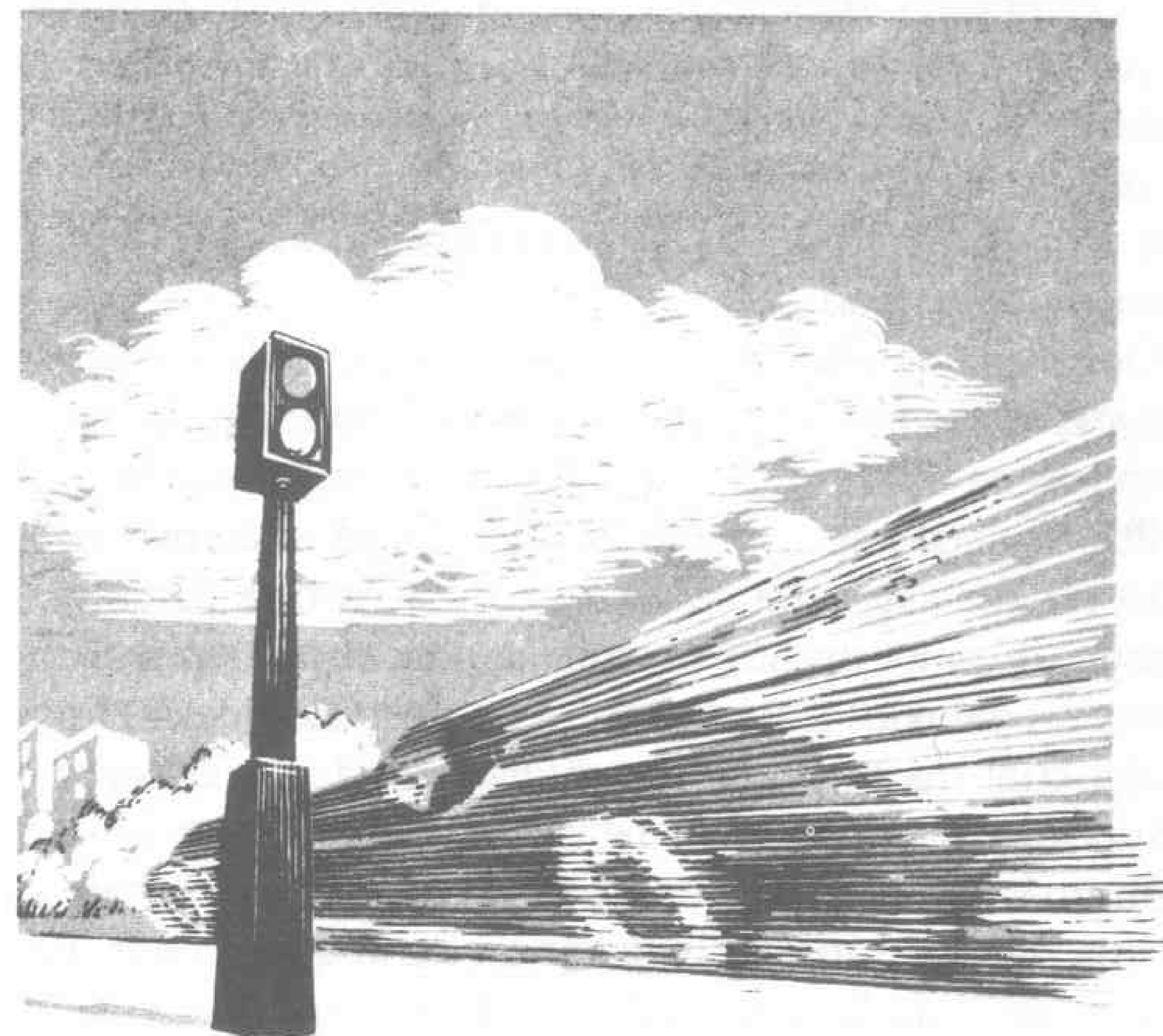


Otros modelos cosmológicos, todos ellos consistentes con la teoría de la relatividad general, fueron propuestos y debatidos durante los años veinte. Algunos de ellos poseen propiedades todavía más extrañas que las del Universo cilíndrico de Einstein. El astrónomo holandés Willem de Sitter propuso otro modelo cerrado y finito, pero en su modelo no solamente se curva el espacio, sino también el tiempo. Cuanto más lejos se dirige la vista a través del espacio de De Sitter, tanto más lentamente parecen funcionar los relojes. Si se mira suficientemente lejos, se llega a una región donde el tiempo se detiene por completo, «como aquel té del sombrerero loco», escribe Eddington, «donde siempre son las seis.»

«No existe ningún borde», nos cuenta Bertrand Russell en su delicioso libro *El ABC de la relatividad.* «Quienes viven en lo que nuestro observador piensa que es la tierra del loto (todo transcurre muy despacio) viven una vida tan bulliciosa como la de él, pero dan la impresión de estar eternamente quietos. Desde luego, el observador nunca sabrá nada de la tierra del loto, puesto que su luz tardará un tiempo infinito en llegar hasta él. La tierra del loto y todos los lugares más alejados que ella permanecerán siempre más allá del alcance de su vista.» Por descontado que, si viajáramos hacia esta región en una nave espacial, manteniéndola bajo constante observación con la ayuda de un telescopio, veríamos que en ella el tiempo correría cada vez más deprisa a medida que nos fuéramos acercando. Cuando llegáramos, todo se movería a la velocidad normal. La tierra del loto estaría ahora en el borde de un nuevo horizonte.

¿Han notado alguna vez que el ruido de los motores de un avión desciende bruscamente de tono en el preciso instante en que pasa por encima de su cabeza? Esto es lo que se conoce como efecto Doppler, en honor de Christian Johann Doppler, físico austríaco que lo descubrió a mediados del siglo pasado. La explicación es sencilla. A medida que el avión se acerca a nosotros, su velocidad hace que el tiempo que transcurre entre la llegada a nuestros oídos de dos pulsos de sonido consecutivos procedentes de sus motores sea cada vez más pequeño. Como consecuencia de ello, la frecuencia de la onda sonora aumenta y, por tanto, el tono que escuchamos es más agudo. A medida que el avión se aleja, los pulsos sonoros llegan a nuestros oídos a un ritmo más lento, descendiendo, por tanto, el tono del sonido.

Ocurre exactamente el mismo fenómeno si una fuente emisora de luz se mueve rápidamente acercándose o alejándose de nosotros. Esto no tiene nada que ver con la velocidad de la luz, que es siempre constante, sino con la longitud de



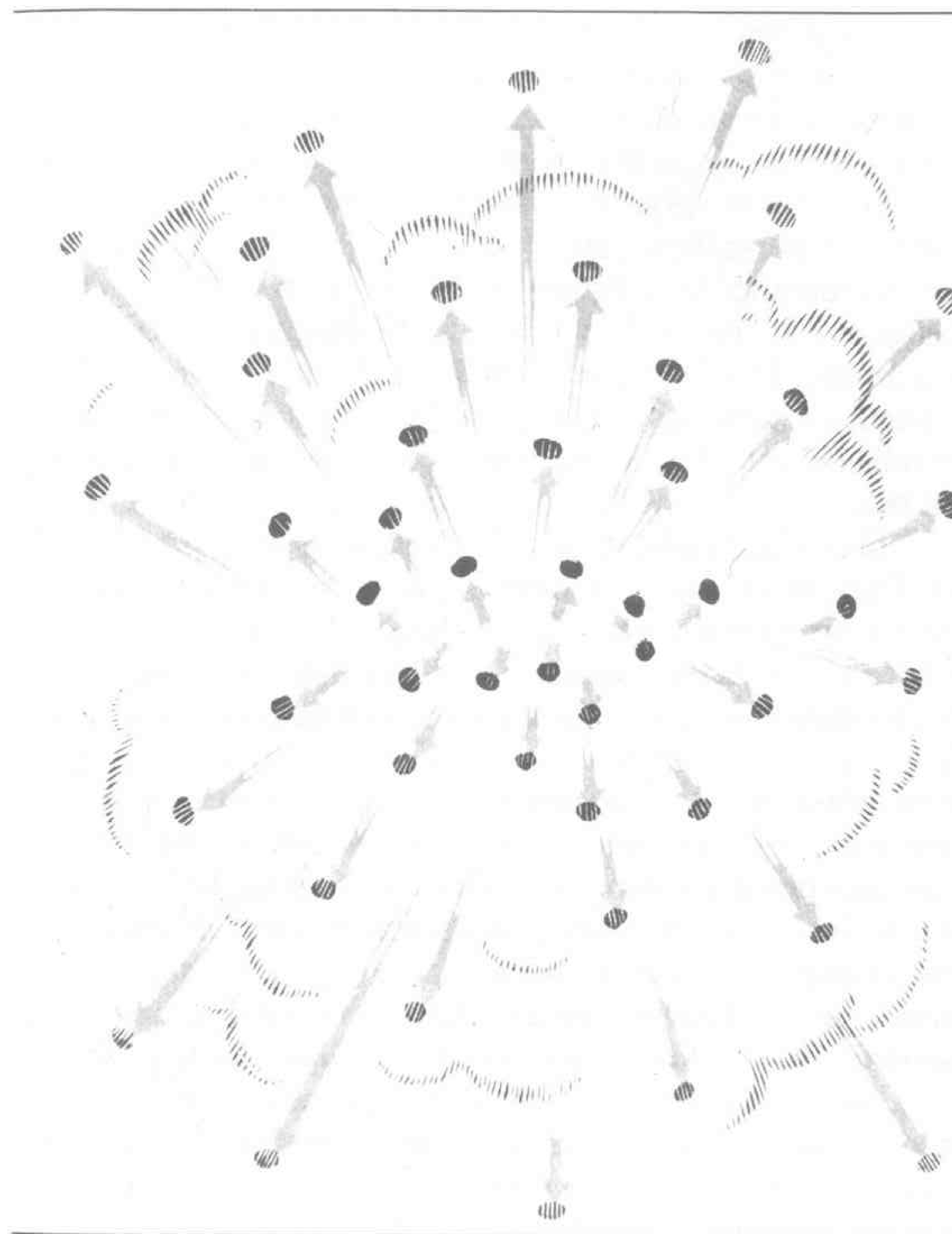
onda de la luz. Si nos encontramos en movimiento relativo respecto a una fuente luminosa que se está acercando a nosotros, el efecto Doppler acorta la longitud de onda de la luz hacia el extremo violeta del espectro. Si nos estamos separando de la fuente de luz, el efecto Doppler produce un corrimiento similar hacia el extremo rojo del espectro.

George Gamow contó en una de sus clases una divertida anécdota (sin duda apócrifa) relacionada con el efecto Doppler. Según parece, Robert W. Wood, un famoso físico norteamericano de la Johns Hopkins University, fue denunciado por pasar un semáforo en rojo en Baltimore. En su comparecencia ante el juez, Wood hizo una brillante exposición del efecto Doppler, explicando cómo su movimiento hacia la luz roja había desplazado el color hacia el extremo violeta del espectro, haciendo que el rojo le hubiera parecido verde. El

juez, convencido, decidió absolverlo, pero Wood no contaba con que uno de sus estudiantes se encontraba en la sala. El estudiante llamó la atención sobre la enorme velocidad que sería necesaria para desplazar el color del semáforo del rojo al verde. El juez cambió los cargos contra Wood y lo multó por exceso de velocidad.

Doppler pensaba que el efecto que había descubierto explicaba el color aparente de las estrellas lejanas: las estrellas más rojizas se estarían alejando de la Tierra, mientras que las estrellas azuladas se estarían aproximando a la misma. Esto resultó no ser cierto (la causa del color es otra distinta). Sin embargo, durante los años veinte se descubrió que la luz procedente de galaxias distantes sufre un desplazamiento hacia el rojo del cual no se podía dar cuenta satisfactoriamente más que suponiendo que las galaxias se están alejando de la Tierra. Además, por término medio, el corrimiento aumenta en la misma proporción que la distancia de la galaxia a la Tierra. Si la distancia de la galaxia A a la Tierra es doble que la de otra galaxia B, el corrimiento hacia el rojo de A tiende a ser dos veces mayor que el corrimiento hacia el rojo de B.

Se han hecho varios intentos de explicar este corrimiento hacia el rojo sin apelar al efecto Doppler. Uno de ellos, la teoría de la "fatiga de la luz", afirma que la luz vibra más lentamente cuanta más distancia recorre. (Esto constituye un perfecto ejemplo de hipótesis *ad hoc,* ya que no existe ningún otro dato a su favor.) Otra explicación es que el paso de la luz a través del polvo cósmico interestelar produce el desplazamiento hacia el rojo. El modelo de De Sitter explica elegantemente el desplazamiento en términos de la curvatura del tiempo. Sin embargo, la explicación más sencilla y la que a la vez encaja mejor con otros hechos conocidos es que el desplazamiento hacia el rojo indica un verdadero movimiento de recesión de las galaxias. Sobre esta hipótesis se basaron nuevos modelos cosmológicos de "universos en expansión".

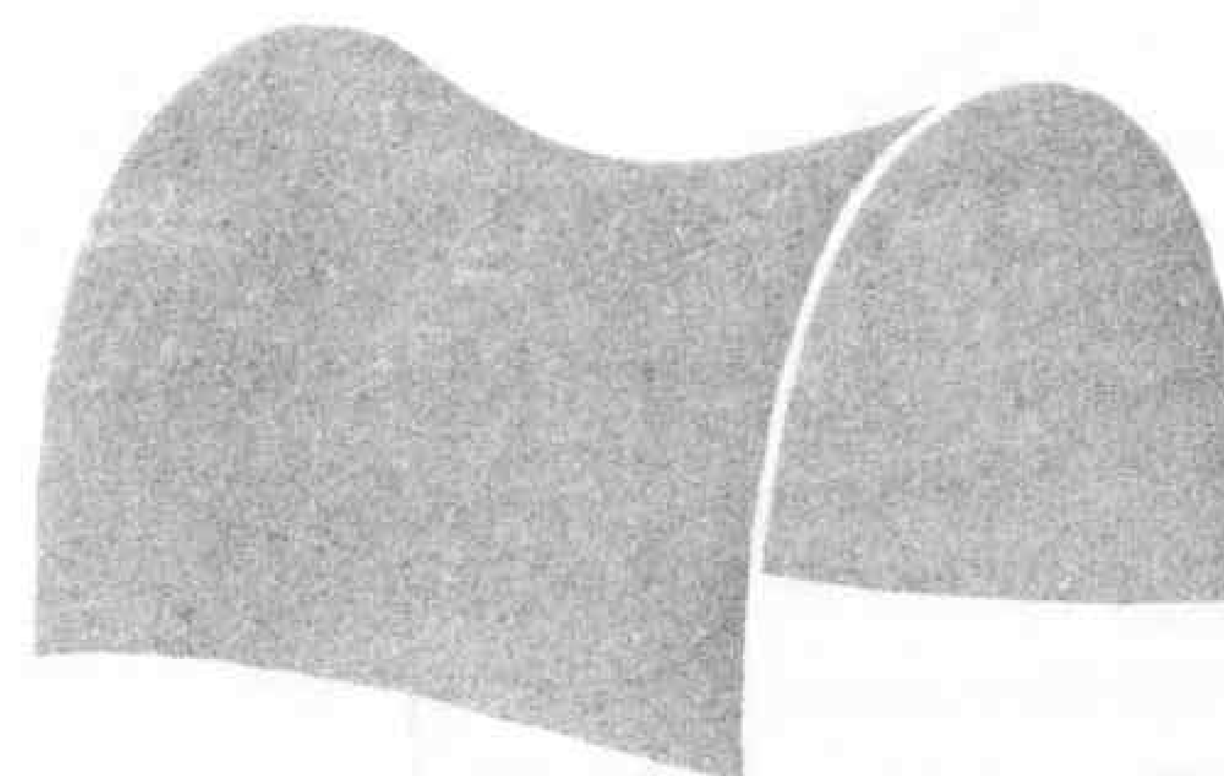


Es importante entender que cuando se habla de expansión no se quiere decir que sean el sistema solar o las galaxias quienes se expanden. Tampoco se expande (según se cree en la actualidad) el propio espacio que separa las galaxias en un

cúmulo galáctico. La expansión parece afectar únicamente al espacio entre los cúmulos galácticos. Ocurre lo mismo que cuando hacemos un pastel con una enorme masa de harina dentro de la cual se han embutido al azar centenares de pasas. Al poner la masa en el horno, ésta se expande uniformemente en todas direcciones, pero las pasas siguen teniendo el mismo tamaño. Es el espacio entre las pasas el que se dilata. Ninguna pasa concreta puede considerarse como el centro de expansión. Desde el punto de vista de una pasa individual cualquiera, todas las demás parecen estar alejándose, y cuanto más distantes las ve, tanto más rápidamente las ve alejarse de ella.

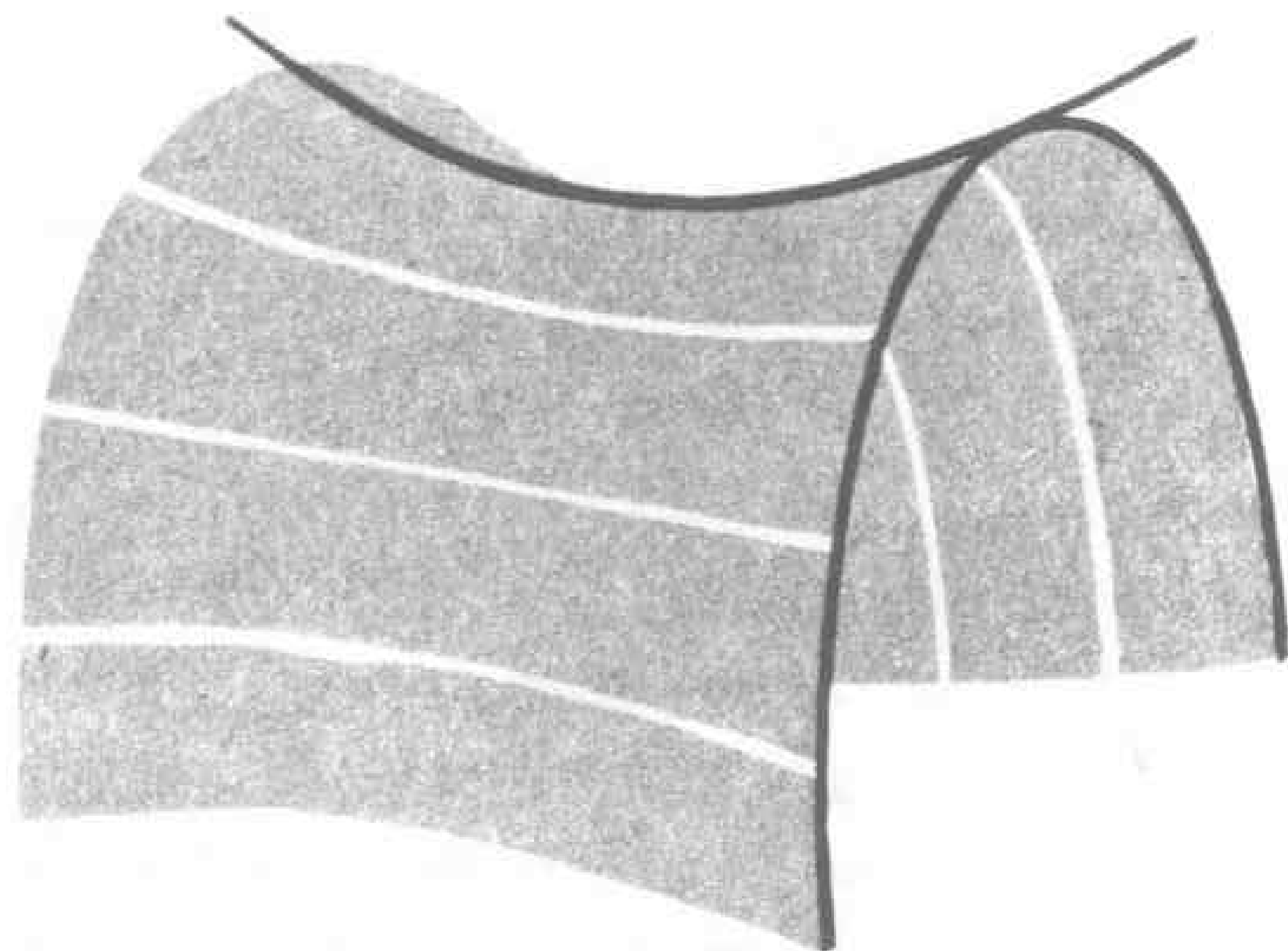
El modelo cosmológico de Einstein es un modelo estático. Esto, desde luego, se debe a que lo propuso antes de que los astrónomos llegaran a la conclusión de que el Universo se estaba expandiendo. Einstein tuvo que introducir una nueva fuerza repulsiva que actúa a distancias muy grandes (a la que llamó "constante cosmológica"), fuerza necesaria para contrarrestar la atracción gravitatoria. Esta fuerza repulsiva sería la responsable de mantener a las estrellas separadas entre sí. Cálculos posteriores mostraron que el modelo de Einstein es inestable, como una moneda colocada de canto. El más mínimo empujón haría caer la moneda a cara o cruz; cara correspondería a un Universo en expansión y cruz a un Universo en contracción. El descubrimiento del desplazamiento hacia el rojo hizo abandonar la hipótesis de la contracción, de modo que los cosmólogos se concentraron en modelos cosmológicos de universos en expansión.

Se construyeron todo tipo de modelos de expansión. El cosmólogo ruso Alexander Friedmann y el belga Georges-Henri Lemaître fueron los autores de dos de los primeros. Algunos de estos modelos suponen un espacio cerrado (curvatura positiva), algunos suponen un espacio abierto (curvatura negativa), otros dejan abierta la cuestión de si el espacio es



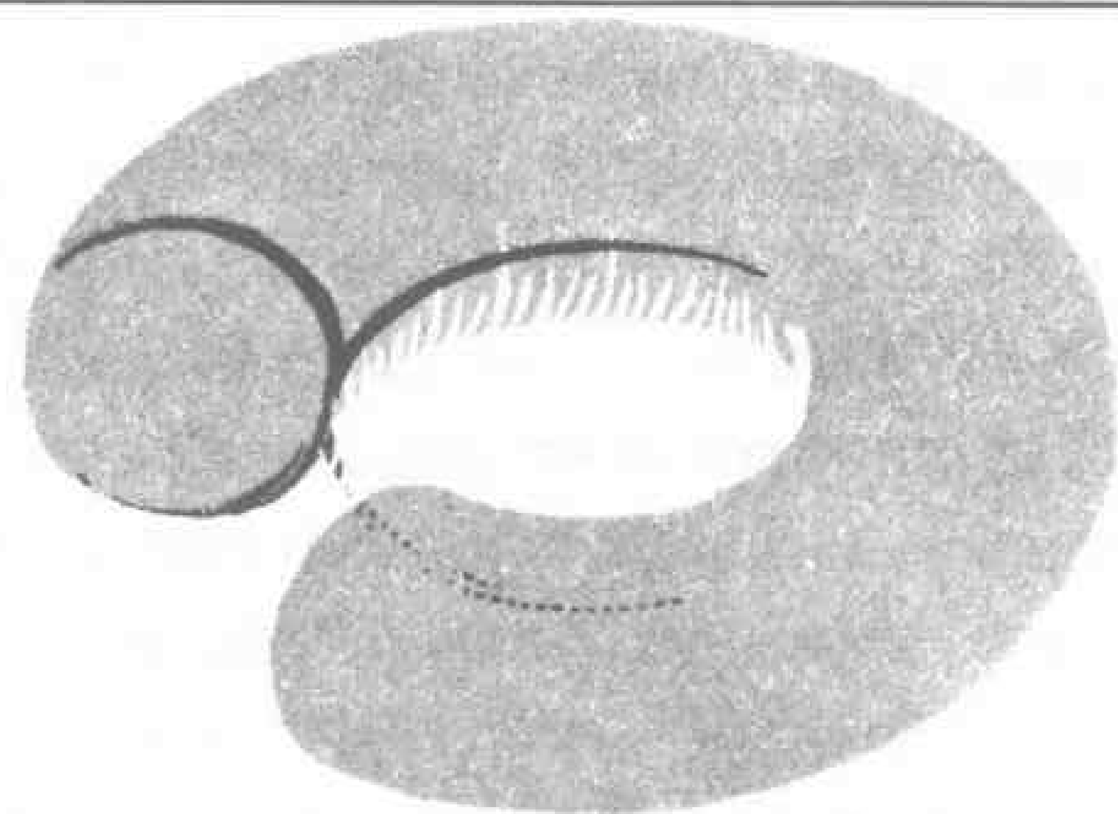
abierto o cerrado. Eddington concibió un modelo y escribió un libro muy asequible sobre el mismo, *The Expanding Universe.* Esencialmente su modelo es el mismo que el de Einstein, cerrado como la superficie de una vasta esfera cuatridimensional, pero expandiéndose uniformemente en sus tres dimensiones espaciales. Hoy día los astrónomos ponen en duda que el espacio se cierre sobre sí mismo. La densidad de materia en el espacio parece insuficiente para explicar tal curvatura global positiva. Los astrónomos se muestran más partidarios de un Universo abierto o infinito con curvatura global negativa, como la superficie de una silla de montar.

No se debe suponer que porque la superficie de una esfera tiene curvatura positiva, el *interior* de la esfera tiene curvatura negativa. La curvatura de la superficie de la esfera es positiva tanto si se mira desde un lado como del otro. La curvatura negativa de la silla de montar se debe a que en cualquier punto de la misma la superficie se curva de dos maneras distintas. Es cóncava si se pasa la mano por encima de atrás adelante y convexa si se pasa la mano de un lado al otro. Una curvatura es expresada por un número positivo y la otra por un número negativo. Para obtener la curvatura de la superficie en un punto dado, se multiplican estos dos números. Si en todos los puntos este producto es negativo, como



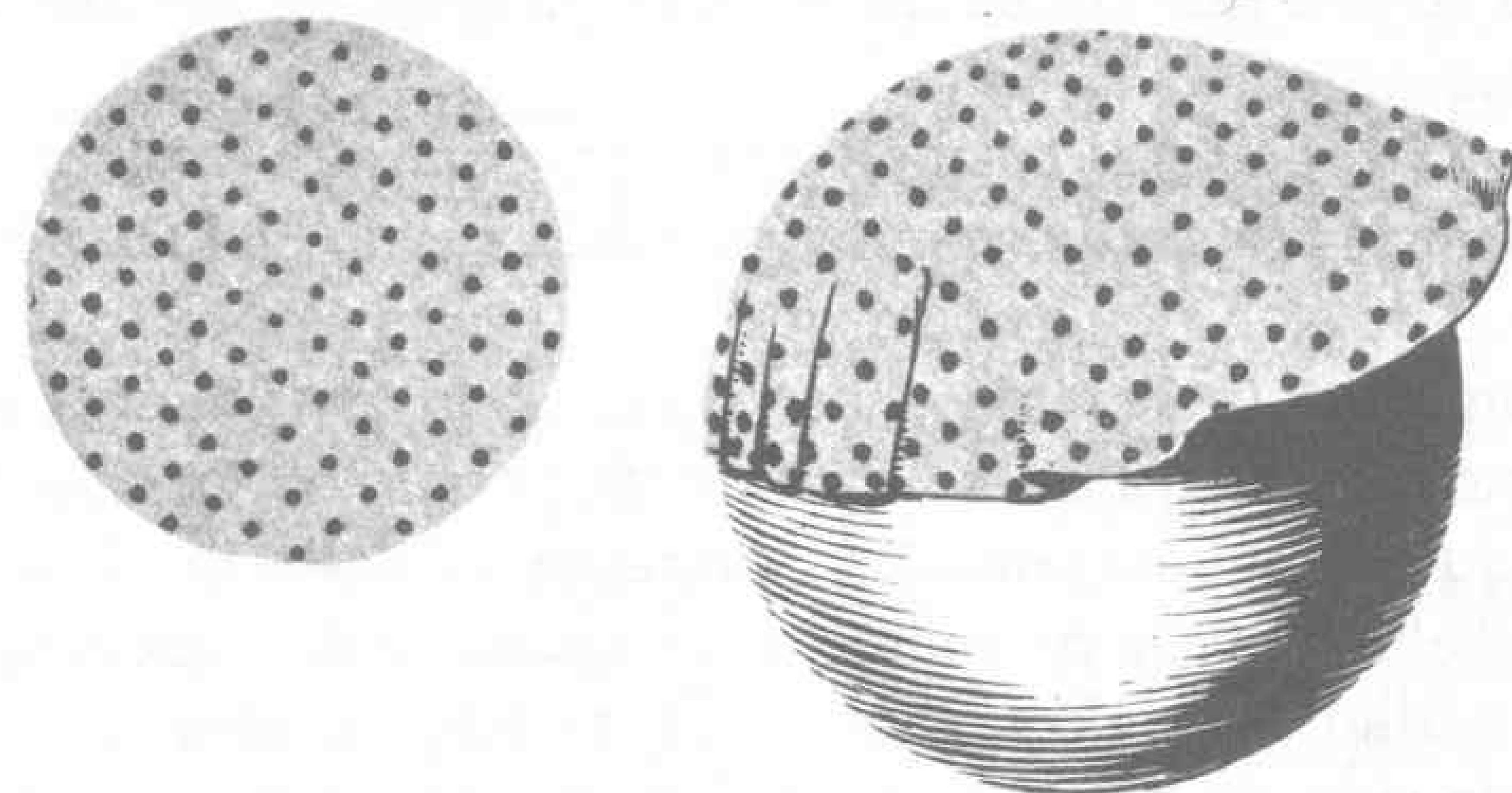
ocurre si en todos los puntos la superficie se curva de dos modos distintos, se dice que la superficie tiene curvatura negativa. La superficie que rodea el hueco de un toro (una cámara de neumático) constituye otro ejemplo familiar de superficie con curvatura negativa. Estas superficies tan sólo son, desde luego, imágenes esquemáticas de un espacio tridimensional con curvatura negativa.

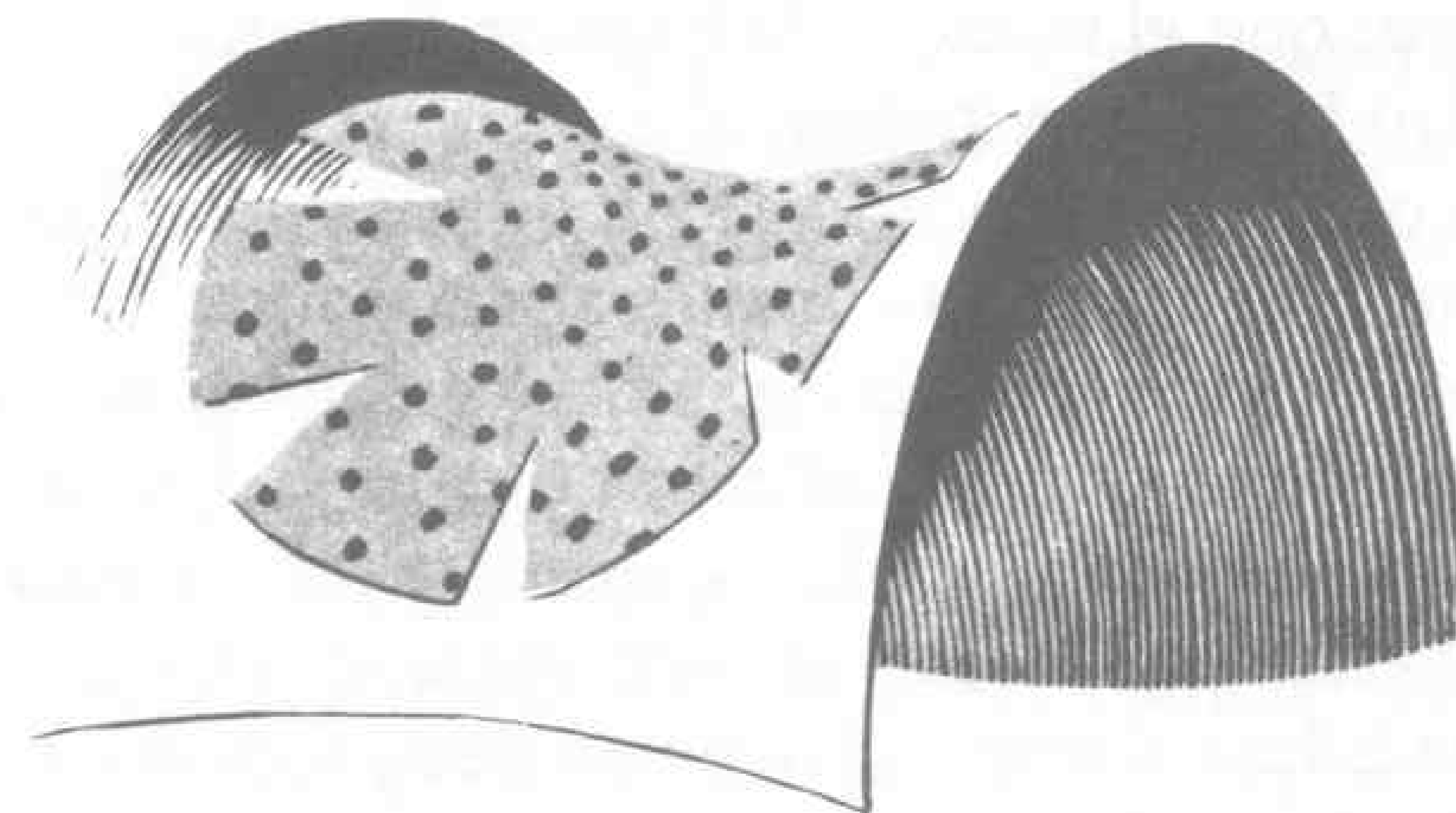
Quizás en el futuro dispondremos de telescopios más potentes que permitan determinar si el Universo tiene curvatura positiva, negativa o nula. Un telescopio solamente puede



examinar las galaxias que ocupan un determinado volumen esférico. Si las galaxias se encuentran distribuidas aleatoriamente y si el espacio es euclídeo (curvatura cero), el número de galaxias comprendidas en el interior de una esfera tal es siempre proporcional al cubo del radio de la misma. En otras palabras, si se construyera un telescopio de alcance doble que el de cualquier otro telescopio conocido, el número de galaxias que podrían observarse subiría de *n* a 8*n*. Si el salto observado fuera menor, esto indicaría una curvatura positiva del Universo; si fuera mayor, indicaría una curvatura negativa.

Podría parecer que debe ocurrir todo lo contrario. Considérese el caso de superficies bidimensionales de curvatura





positiva y negativa. Supóngase que recortamos un círculo de una lámina plana de goma. Sobre él pegamos pasas a un centímetro de distancia unas de otras. Para adaptar el círculo a la superficie de una esfera, debemos *comprimirlo*, de modo que las pasas se encontrarán más apretadas. En otras palabras, si las pasas deben permanecer a un centímetro de distancia sobre la superficie de la esfera, se necesitarán *menos* pasas. El recíproco es cierto si se intenta adaptar la hoja de goma a la superficie de una silla de montar. Ésta *estira* la goma y separa las pasas. Para mantenerlas a un centímetro de distancia sobre la superficie de la silla se necesitarán *más* pasas. Según dice un viejo chiste matemático, al comprar una botella de cerveza debemos decir al tendero que queremos una botella que contenga espacio curvado negativamente, no positivamente.

Los modelos cosmológicos de expansión hicieron innecesaria la constante cosmológica de Einstein, la fuerza hipotética repulsiva que impide que las estrellas se precipiten unas sobre otras (más tarde el propio Einstein consideraría el concepto de una constante cosmológica como el error más grande que cometiera jamás). Los nuevos modelos resolvieron inmediatamente el problema de la paradoja de Olbers sobre la oscuridad del cielo nocturno. El modelo estático de Einstein había sido de muy poca utilidad en este sentido. Si bien es cierto que el modelo de Einstein únicamente suponía un número finito de estrellas, el carácter cerrado de su espacio hacía que la luz procedente de estas estrellas quedara atrapada para siempre dando vueltas alrededor del Universo, desviándose ocasionalmente debido a las deflexiones producidas por distorsiones locales del espacio-tiempo. Esto iluminaría el cielo nocturno tanto como si existiera un número infinito de estrellas, a menos que se suponga que el Cosmos es tan joven que la luz solamente ha tenido tiempo de dar un número limitado de vueltas a su alrededor.

La noción de un Universo en expansión elimina la paradoja de una manera muy sencilla. Si las galaxias distantes se alejan de la Tierra a una velocidad proporcional a su distancia, se produce un efecto de amortiguamiento sobre la cantidad total de luz que alcanza a la Tierra. Si una galaxia está suficientemente lejos, su velocidad excederá a la de la luz, con lo cual la luz procedente de la misma nunca llegará hasta nosotros. Muchos astrónomos están convencidos de que si las galaxias no estuvieran alejándose no habría la más mínima distinción entre el día y la noche.

El hecho de que las galaxias distantes puedan sobrepasar la velocidad de la luz con respecto a la Tierra parece violar el principio relativista según el cual ningún cuerpo material puede ir más deprisa que la luz. Sin embargo, tal como vimos en el capítulo 4, este principio sólo es válido en las condiciones en que la teoría especial de la relatividad es aplicable. En la teoría general debe ser reformulado diciendo que no puede transmitirse ninguna señal más deprisa que la luz. Sin embargo, no está claro todavía que las galaxias distantes puedan cruzar, por así decir, la barrera de la luz y desvanecerse para siempre, haciéndose inobservables incluso en el caso de que dispusiéramos de los telescopios más potentes que puedan imaginarse. Algunos expertos piensan que la velocidad de la luz *es* también un límite aquí, que las galaxias más distantes se hacen más tenues cuanto más lejos se encuentran, pero sin llegar a hacerse nunca totalmente invisibles (si disponemos, claro está, de instrumentos suficientemente sensibles para detectarlas).

Alguien dijo en una ocasión que las viejas galaxias nunca mueren. Simplemente se desvanecen. Es importante entender, sin embargo, que ninguna galaxia se esfuma en el sentido de que su materia desaparezca del Universo. Simplemente llegan a alcanzar una velocidad que hace que sea imposible, o casi imposible, que los telescopios en la Tierra puedan de-

tectarlas. Las galaxias desaparecidas siguen siendo visibles, sin duda, desde todas aquellas galaxias cercanas a ellas. Para cada galaxia existe un "horizonte óptico", un borde esférico más allá de cuyo límite sus telescopios no pueden penetrar. Estos horizontes esféricos son distintos para dos galaxias cualesquiera. Los astrónomos calculan que el punto en que las galaxias pueden desaparecer en *nuestro* "borde" se encuentra aproximadamente a una distancia próxima al doble del alcance de nuestros telescopios actuales. De ser esta hipótesis correcta, estamos viendo en la actualidad una octava parte de todas las galaxias que nunca podrán ser observadas.

Si se acepta la expansión del Universo (con independencia de que sea o no euclídeo, abierto o cerrado), surgen inmediatamente dos interrogantes. ¿Cómo era el Universo antes de empezar a expandirse?, y si avanzamos en el tiempo tanto como podamos imaginar, ¿qué le ocurrirá al Universo? Estas cuestiones serán tratadas en el último capítulo. Pero primero debemos echar un vistazo a algunos recientes y espectaculares descubrimientos astronómicos.

XI. QUASARS, PULSARS Y AGUJEROS NEGROS

En los últimos quince años, el interés por la teoría de la relatividad ha aumentado notablemente. Sobre ella se han escrito montones de libros importantes y cientos de artículos especializados. Ya hemos visto cómo nuevas técnicas de laboratorio han permitido nuevas confirmaciones de la relatividad general. Pero ésta no es más que una de las razones de la explosión de la relatividad. La razón principal es que en 1962, el mismo año en que salió a la calle la primera edición de este libro, se inició una serie de increíbles descubrimientos astronómicos, todos ellos relacionados con la teoría de la relatividad, que estimularon las mentes de los astrónomos y los físicos.

El primero de estos extraordinarios descubrimientos fue el hallazgo de un tipo radicalmente nuevo de objeto estelar llamado "quasar". El nombre es una abreviatura de radiofuente "cuasiestelar" ("quasi-stellar" en inglés). El primer quasar que se identificó se conoce como 3C 273*, el más brillante y seguramente el más próximo a nosotros de todos los quasars. Los radioastrónomos australianos lo habían localizado como una fuente emisora muy intensa de ondas de radio. Posterior-

* El prefijo 3C quiere decir "Tercer catálogo de Cambridge de radiofuentes", lista confeccionada por el astrónomo inglés Martin Ryle y sus colaboradores. Los otros números representan el lugar que ocupa la radiofuente en dicho catálogo. *(N. del T.)*

mente Maarten Schmidt, del observatorio de Monte Palomar, en el sur de California, lo relacionó con una difusa mancha luminosa en el cielo. El análisis del espectro de la luz procedente de la mancha condujo a Schmidt a un estado de *shock*. El corrimiento hacia el rojo era tan enorme que, aparentemente, 3C 273 se está alejando de nosotros a una velocidad de cerca del 15 % de la velocidad de la luz y se encuentra tan alejado de nosotros (más de mil millones de años luz) que no existe ninguna manera sencilla de justificar la intensidad de la emisión de radioondas. Es demasiado grande para tratarse de una estrella, demasiado pequeño y demasiado denso para ser una galaxia y, sin embargo, está radiando energía a raudales, mucho más que si se tratase de una galaxia.

Pronto se detectaron otros quasars, muchos de ellos más difíciles de entender todavía que 3C 273. Uno de ellos parece que se está alejando de nosotros a una velocidad que supera el 90 % de la velocidad de la luz, despidiendo energía con una intensidad cien veces superior a la de una galaxia típica. Se han descubierto quasars con los mismos fantásticos desplazamientos hacia el rojo, pero emitiendo muy poca (o prácticamente ninguna) emisión radio. Se les denomina "quasars radioestables". Se han localizado cientos de quasars y cada semana se descubre alguno. Una exploración completa del firmamento tal vez mostraría que existen millones de ellos.

No existe acuerdo entre los expertos sobre la naturaleza de los quasars, sobre qué son, dónde están, cómo llegaron allí o qué les está sucediendo. En la actualidad, el debate se centra en determinar *dónde* están. La mayoría de los cosmólogos están persuadidos de que se encuentran en el borde mismo del Universo observable. Esto significa que estamos viendo objetos que están prácticamente a la máxima distancia que somos capaces de observar y tan atrás en el tiempo como es posible imaginar. Esto implica que los quasars surgieron hace

miles de millones de años, cuando el Universo acababa de nacer.

Un pequeño grupo de astrónomos discrepa totalmente. Según ellos, los quasars están tan cerca que, de hecho, se encuentran dentro del cúmulo de galaxias a la cual pertenece nuestra Vía Láctea. Si es así, sus enormes corrimientos hacia el rojo deben tener alguna otra explicación poco convencional. Quizás en el momento de formarse nuestra galaxia los quasars fueron arrojados fuera de la misma y se están alejando aún de nosotros a toda velocidad. Quizá los desplazamientos hacia el rojo están producidos por fuerzas gravitatorias colosales, o por efecto de "fatiga de la luz", o por cualquier otra causa todavía no conocida. Cualquiera de estas explicaciones, caso de confirmarse, sumergiría a la moderna cosmología en un caos total.

Aquellos que creen que los quasars se encuentran cerca de nosotros son sin duda los responsables de aquella pulla según la cual los cosmólogos cortos de vista piensan que los quasars se encuentran lejos, mientras que los cosmólogos con visión de largo alcance piensan que se encuentran cerca. Astrónomos como Halton C. Arp, James Terrell y Geoffrey y Margaret Burbidge son los líderes del segundo grupo. Señalan lugares donde dos o más quasars parecen estar relacionados, pero en cambio poseen desplazamientos hacia el rojo totalmente distintos. Hay un caso de un par de quasars que parecen estar conectados por un arco de luz, pero cuyos desplazamientos hacia el rojo no son iguales. Los cosmólogos "cortos de vista" aducen que se trata de anomalías ópticas; que aquellos quasars que parecen estar ligados por algún tipo de relación se encuentran, en realidad, separados por remotas distancias.

En 1971, los astrónomos decubrieron dos radiofuentes, asociadas con un quasar, que parecen estar separándose entre sí a ¡nueve veces la velocidad de la luz! En el capítulo 4

vimos cómo la relatividad permite que un observador descubra que la velocidad relativa de dos objetos es casi dos veces la velocidad de la luz. Sin embargo, nueve veces la velocidad de la luz está en total contradicción con la teoría de la relatividad. Por otro lado, si el quasar estuviera cerca de nosotros, las estimaciones de las velocidades relativas de las dos radiofuentes descenderían a valores aceptables. Los cosmólogos que creen que este sistema particular se encuentra muy alejado, se defienden diciendo que las velocidades relativas son una ilusión causada por "un efecto de árbol de Navidad". Objetos, o partes de los mismos, totalmente inmóviles pueden estar encendiéndose y apagándose como bombillas de un árbol de Navidad, de modo que produzcan la ilusión de un movimiento imposible.

El origen de la energía de los quasars constituye también un oscuro enigma. La teoría más popular trata de explicarlo mediante el desplome gravitatorio, un proceso que expondremos más tarde en este mismo capítulo con más detalle. George Gamow escribió el siguiente verso para parodiar la gran perplejidad de los astrofísicos:

«Brilla, brilla, cuasiestrella,
como el mayor de los misterios.
¡Cuán distinta eres de las otras!;
más brillante que un billón de soles.
Brilla, brilla, cuasiestrella,
qué no daría por saber qué eres.»

Cuando los astrónomos estaban dando vueltas al asunto y trataban de recobrar la compostura, se vieron sorprendidos por un descubrimiento todavía más extraño: el de los "pulsars". Los pulsars son objetos que emiten pulsos de radio periódicamente con un sincronismo tan exacto que cuando los radioastrónomos de Cambridge los detectaron por primera vez en 1967 no podían creer que se las estuvieran viendo con

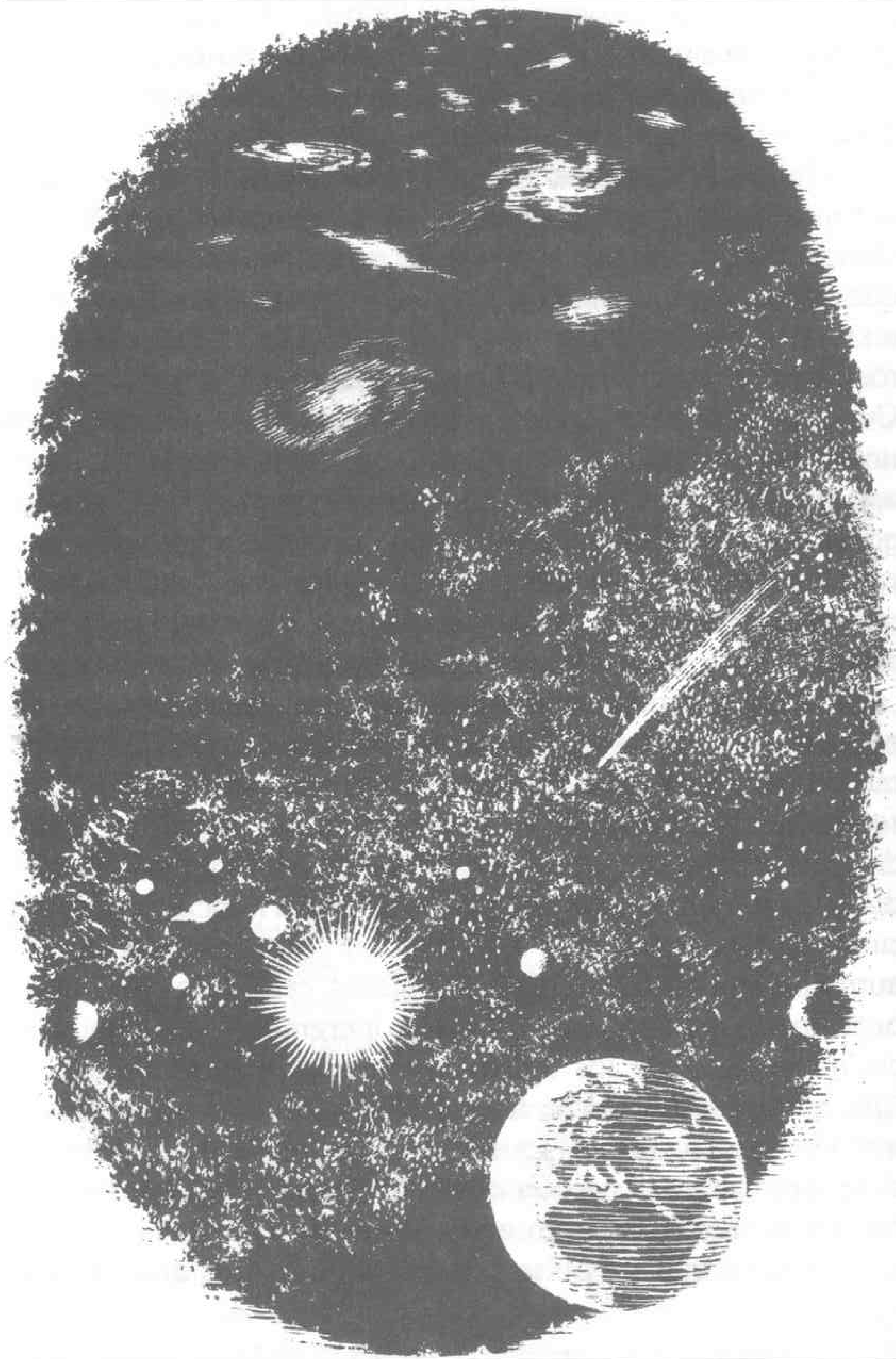
un fenómeno de origen natural. Durante unas pocas semanas pensaron realmente que habían interceptado algún tipo de mensaje procedente de vida inteligente más allá del Sistema Solar.

Uno de los pulsars, NP 0531, se encuentra dentro de la nebulosa del Cangrejo en la constelación del Toro. Está enviando pulsaciones a un ritmo de unas treinta por segundo, con la precisión de un reloj que se desviara sólo un segundo en muchos millones de años. Cuando los astrónomos dirigieron sus telescopios ópticos hacia la zona de la nebulosa del Cangrejo desde donde venían los pulsos, se encontraron con una nueva sorpresa. Encontraron una luz que ¡se encendía y apagaba en perfecta sincronización con los pulsos! Desde luego había estado haciéndolo durante todo el tiempo, pero parpadeaba tan rápidamente que había aparecido siempre, tanto para el ojo como en las fotografías, un punto luminoso estable.

Desde entonces se han detectado más de un centenar de pulsars, algunos de los cuales emiten tanto luz visible como radioondas. Los períodos de los "tic" varían desde 1/30 de segundo (el tic de NP 0531) hasta casi cuatro segundos. Usando relojes atómicos, los astrónomos han sido capaces de medir estos períodos con precisiones de hasta la octava cifra decimal de un segundo y de descubrir que todos ellos van aumentando en pequeñísimos valores cada año. De modo ocasional, un pulsar sufre un súbito incremento en la frecuencia de emisión de los pulsos (los astrónomos lo llaman un "*glitch**"). A NP 0531 le ha sucedido ya varias veces desde que fue identificado. Al igual que sucede con los quasars, se descubren nuevos pulsars constantemente y puede ser que haya millones de ellos en el firmamento.

Se sabe que los pulsars, a diferencia de los quasars, son

* En español se utiliza la palabra "glitch" sin traducirla. *(N. del T.)*



pequeños objetos estelares que se encuentran en el interior de nuestra galaxia. La mayoría de los astrónomos están convencidos de que son estrellas de neutrones que giran muy rápidamente, emitiendo breves señales de radio y a veces luz intermitente como si fueran faros en la costa. Para explicar lo que es una estrella de neutrones, vamos a echar un rápido vistazo a las tres formas distintas de muerte estelar en nuestra galaxia. Sucede que la muerte es más suave cuanto menor es el tamaño de la estrella; cuanto más masa posee la estrella, más violenta es su extinción. Sólo hablaremos de lo que le ocurre a una estrella típica, pero hay que tener presente que detrás de cada frase se esconde una enorme cantidad de trabajo teórico que representa una extraordinaria simbiosis de la astronomía con la teoría de la relatividad y la física de partículas.

En primer lugar, veamos cuál es el destino probable, según los astrofísicos, de una estrella del tamaño de nuestro Sol o menor. Con el tiempo, la estrella quemará todo su combustible de hidrógeno y se expandirá hasta unas cien veces su tamaño actual, para convertirse en lo que se conoce como gigante roja. La expansión, sin duda, hará disminuir enormemente la densidad de la estrella. Probablemente, cuando le ocurra esto a nuestro Sol, dentro de miles de millones de años, absorberá a Mercurio, Venus y la Tierra. Betelgeuse, la estrella rojiza que forma el "hombro" derecho de la constelación de Orión, es un ejemplo de gigante roja.

Las gigantes rojas formadas a partir de estrellas pequeñas permanecen en esa condición muy poco tiempo. Pronto sufren una contracción gravitatoria que las convierte en lo que se conoce como enana blanca, una estrella del tamaño aproximado de la Tierra, pero de tanta masa como el Sol. Un pedazo de enana blanca del tamaño de un guisante pesaría (en la Tierra) tanto como un hipopótamo. La enorme presión de compresión gravitatoria que sufre la enana blanca se ve

contrarrestada por la presión de radiación que crean los electrones al moverse muy rápidamente. La sustancia de la estrella nunca pierde su estructura atómica. A medida que transcurre el tiempo, la enana blanca se enfría lentamente hasta que queda reducida a una masa de cenizas denominada enana negra.

Supongamos ahora que la estrella original es ligeramente mayor que el Sol, pero por debajo del doble de su tamaño. Es muy probable que también se convierta en una gigante roja. Sin embargo, cuando empieza a contraerse, su mayor masa hace que sobrepase un cierto límite crítico. La estrella puede estallar entonces, convirtiéndose en una supernova. Cuando esto sucede, la explosión se hace visible en nuestra galaxia como si hubiera aparecido una nueva estrella mucho más brillante que las demás. La nebulosa del Cangrejo es el remanente de una explosión de supernova. Tuvo lugar en 1054 y los astrónomos orientales la registraron cuidadosamente. El porqué de que no tengamos constancia de este fenómeno en el mundo occidental sigue siendo un misterio.

Se cree que cuando se produce un estallido de supernova ocurre algo verdaderamente notable. J. Robert Oppenheimer y otros físicos lo calcularon matemáticamente en 1938. En unos pocos segundos, la mayor parte de la masa de la estrella se contrae en una estrella de un tamaño mucho más pequeño que la Tierra, una estrella de no más de diez o veinte kilómetros de diámetro. En una masa tan formidablemente concentrada, las fuerzas gravitatorias son tan intensas que la estrella pasa a tener una densidad un millón de veces superior a la de la Tierra. Un pedazo de esta estrella del tamaño de una canica pesa millones de toneladas. La materia se encuentra demasiado comprimida para conservar la estructura atómica. Los electrones y los protones pierden su identidad individual y pasan a formar neutrones. La estrella se convierte entonces en una estrella de neutrones.

¿Han observado alguna vez que cuando un patinador artístico sobre hielo quiere girar sobre sí mismo como una peonza, empieza a hacerlo con los brazos abiertos y de pronto los aprieta contra su cuerpo? La razón es que este súbito desplazamiento de la masa hacia una órbita de giro de radio menor hace que el cuerpo gire más deprisa. Esto es precisamente lo que le ocurre a una estrella de neutrones que se ha contraído muy rápidamente. La velocidad angular que tenía como gigante roja se ve acelerada enormemente. El resultado final es una diminuta estrella de neutrones increíblemente compacta que gira más deprisa que una bola en la punta de los dedos de un malabarista. Al girar emite radiopulsos, algunas veces acompañados de pulsos de luz. Cómo lo hace está aún lejos de entenderse. La teoría más reciente supone que la materia de la estrella se encuentra en un estado de superfluido —un estado próximo al cero absoluto de temperatura en el que no existe viscosidad ni rozamiento— y recubierta de una corteza sólida delgada. Los terremotos que se produjeran en esa corteza podrían ser la causa de los súbitos aumentos de frecuencia del pulsar.

Con el tiempo, el gas de la supernova se extingue. Sin embargo, la explosión de la nebulosa del Cangrejo es tan reciente que el cielo está todavía rebosante de sus residuos gaseosos. El pequeño pulsar que se encuentra en el centro es la estrella de neutrones que una vez fuera una estrella de un tamaño ligeramente superior a nuestro Sol.

Llegamos ahora al tercer tipo de muerte estelar. Es ésta una muerte tan extraña que nadie antes de la relatividad hubiera creído por un momento que tal hipótesis fuera algo más que el producto de la imaginación de un científico excéntrico o de un escritor de ciencia ficción.

Un destino de este tercer tipo le espera a una estrella con una masa original mucho mayor que la del Sol, por ejemplo, una masa diez o más veces mayor. Tal vez la enorme estrella

pase por la fase de gigante roja, pero ahora, cuando empieza el desplome gravitatorio, su masa es tan grande y la fuerza de la gravedad tan colosal que la presión de radiación de los electrones es insuficiente para mantener la estrella en el estado de neutrones. La implosión sigue su curso. Se convierte en un desplome catastrófico totalmente desbocado que transforma la estrella en lo que se conoce como agujero negro.

Como vimos en el capítulo 6, las grandes masas alteran la estructura del espacio-tiempo de tal modo que los rayos de luz que pasan cerca de un cuerpo de gran masa a lo largo de líneas geodésicas, siguen trayectorias que vemos como curvas en nuestro espacio ordinario tridimensional. Cuanto mayor es la masa, mayor es la distorsión del espacio-tiempo y mayor la desviación de la luz. Unos pocos meses después de que se publicara la teoría general de la relatividad, el astrónomo alemán Karl Schwarzschild demostró que si la fuerza gravitatoria comprime a una masa dentro de cierto radio (que depende de la cantidad de masa), la gravedad se hará tan intensa que ningún tipo de materia, radiación o señal podrá escapar de la misma. El radio de esta esfera en la que todo puede caer, pero de la que nada puede escapar, se conoce como *radio de Schwarzschild.* Una de las propiedades más importantes de los agujeros negros es que son menores que su radio de Schwarzschild.

El matemático francés Pierre Simon de Laplace ya había señalado en 1798, usando la teoría de la gravitación de Newton, que una estrella podía ser tan densa que no dejara escapar la luz. Ésta es la primera anticipación de lo que se conoce en la actualidad como agujero negro. En 1939, Oppenheimer y un discípulo suyo, Hartland S. Snyder, realizaron cálculos similares a los de Laplace, pero empleando las fórmulas más refinadas de la teoría de la relatividad. Demostraron que si la masa de una estrella fuera suficientemente grande, ésta sufriría un desplome gravitatorio catastrófico hasta alcanzar una

densidad y un tamaño por debajo del radio de Schwarzschild. Dado que la luz no podría escapar de este agujero negro, la estrella se haría invisible. No se podría ver, por ejemplo, dirigiendo un foco hacia ella, puesto que el agujero absorbería toda la luz. Alguien ha dicho que si no hay agujeros en el espacio, hay lagunas en la teoría de la relatividad.

Para una estrella de la masa de nuestro Sol, el radio de Schwarzschild se sitúa entre uno y dos kilómetros. Para un objeto como la Tierra, es más pequeño que el de una canica. Una estrella típica, con una masa suficiente para transformarse en agujero negro, daría lugar a un agujero con un radio de sólo unos kilómetros. En el núcleo del agujero se encuentra lo que los matemáticos denominan una "singularidad". Nada se sabe de lo que le ocurre a la materia en este punto, puesto que la mecánica cuántica deja de ser aplicable en este dominio. Las fuerzas gravitatorias se hacen infinitas. La densidad y la curvatura del espacio-tiempo se hacen también infinitas. Las partículas materiales desaparecen, trituradas literalmente.

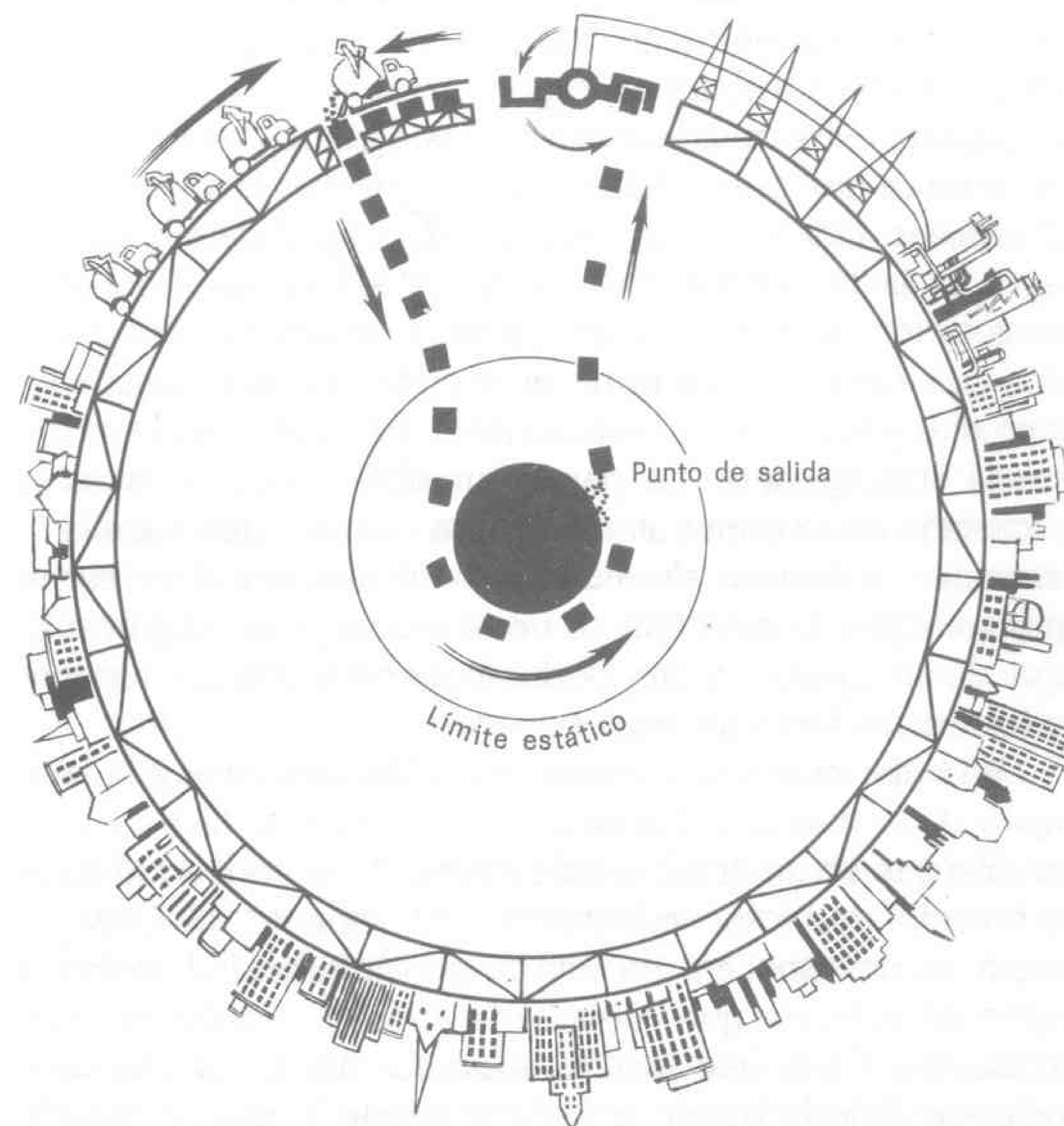
Estas distorsiones tan enormes del espacio-tiempo se reflejan en las percepciones tan radicalmente distintas que diversos observadores tendrían del desplome final. Un observador a salvo, lejos del agujero negro, mediría con su reloj un tiempo de desplome infinito, pero otro observador situado en la estrella lo mediría en milisegundos. Un astronauta que cayera en el agujero negro moriría aplastado instantáneamente debido a las enormes fuerzas de marea (véase capítulo 5). Se vería comprimido desde todas las direcciones y quedaría reducido a un fino filamento lineal cuyo espesor, al caer, tendería a cero.

¿Qué ocurriría, al final, con su masa y energía? Nadie lo sabe. ¿Se transformaría en espacio-tiempo puro? ¿Se convertiría en nada? ¿Hay alguna diferencia entre la nada y el espacio-tiempo? Quizás una estrella que se transforma en un agujero negro pasa a través de lo que el físico John Archibald

Wheeler ha denominado un "agujero de carcoma" para reaparecer en otra región de nuestro Universo. O quizá aparece en otro Universo fuera de nuestro espacio-tiempo. Algunos físicos han especulado con que nuestros agujeros negros son aberturas a través de las cuales la energía escapa constantemente hacia otros universos. Los agujeros por donde emerge esta energía se denominan agujeros blancos. ¿Podría ser que los agujeros negros de otros cosmos fueran agujeros blancos en el centro de los quasars, agujeros a través de los cuales la energía entre a borbotones en *nuestro* espacio-tiempo?

Otro interrogante, sobre el que existe en la actualidad un febril debate, es si un agujero negro es capaz de girar. La hipótesis es que, dado que las estrellas pueden girar, una estrella que se convierta en agujero negro debe producir un agujero en rotación. Si fuera así, el agujero negro podría proporcionar energía ilimitada a una civilización tecnológicamente avanzada. Wheeler ha imaginado una sociedad de estas características viviendo en una gigantesca estructura esférica que se ha construido alrededor de un agujero negro en rotación del tamaño de una semilla de mostaza. Incluso ha concebido un sistema para eliminar la basura, arrojándola al negro abismo. El agujero elimina la basura de manera limpia, triturándola y haciéndola desaparecer, al tiempo que produce energía para satisfacer todas las necesidades de la floreciente civilización que se ha asentado en el caparazón esférico.

Algunos físicos especulan sobre la posibilidad de que nuestro Universo albergue millones de estos "miniagujeros negros". El 30 de junio de 1908 hubo una misteriosa explosión en la Siberia central. Fue un cataclismo de tales proporciones que arrancó los árboles en un radio de más de treinta kilómetros en todas direcciones. Hasta hoy nadie sabe la causa de tan monstruoso estallido. No pudo tratarse de un meteoro, puesto que no se encontraron trazas de un cráter ni de ningún meteorito enterrado. Quizá un cometa alcanzó la Tie-



rra. Pero, ¿podría haber sido un miniagujero negro del tamaño de un grano de polvo que pesara mil millones de toneladas? ¿Podría haber chocado contra la Tierra, atravesándola y emergiendo finalmente en el otro lado para continuar su viaje a través del espacio?

¿Es posible detectar un agujero negro en el cielo? Una manera de buscarlo es estudiar aquellas zonas de donde proceden chorros intensos de ondas gravitatorias. Al transformar-

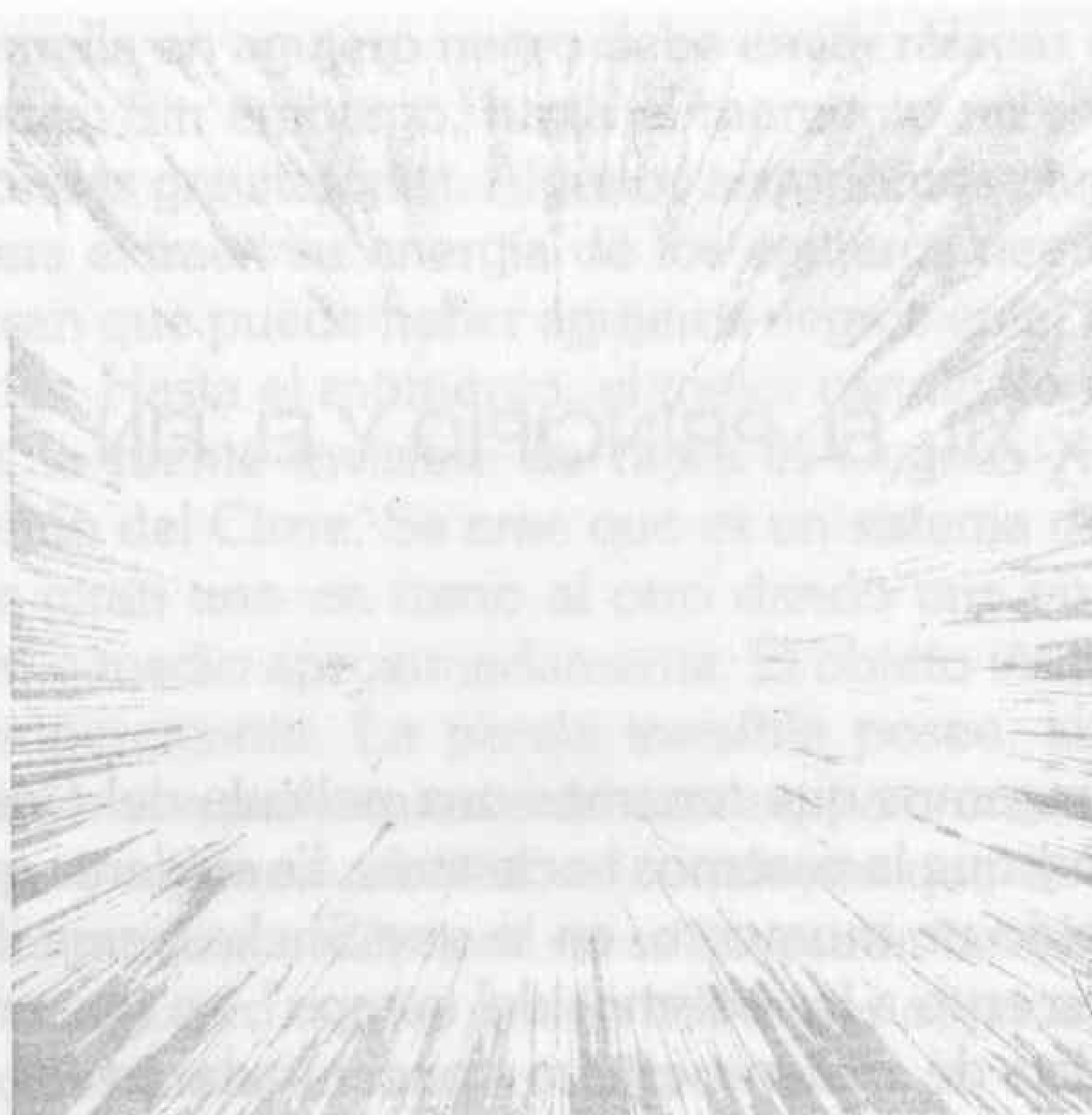
se una estrella en agujero negro debe emitir ráfagas de ondas gravitatorias. Sin embargo, hasta el momento no se han detectado ondas gravitatorias. Algunos astrónomos piensan que los quasars extraen su energía de los agujeros negros. Algunos piensan que puede haber agujeros negros en el centro de las galaxias. Hasta el momento, el mejor candidato a agujero negro es la fuente invisible de rayos X Cygnus X-1, en la constelación del Cisne. Se cree que es un sistema de dos objetos que giran uno en torno al otro dando una vuelta cada cinco días y medio aproximadamente. El objeto visible es una estrella supergigante. La pareja invisible posee, al parecer, demasiada masa para tratarse de una enana o una estrella de neutrones, y algunos astrofísicos concluyen que debe ser un agujero negro. Los escépticos no se muestran tan seguros. En lugar de un agujero negro, podría haber dos objetos, ninguno de los cuales fuera un agujero negro.

Wheeler cree que vivimos en un Universo que a la larga dejará de expandirse. Empezará entonces una fase de contracción que en un determinado momento se convertirá en un desbocado desplome gravitatorio. Finalmente, el Universo entero se desvanecerá en una negra singularidad, como el pájaro de la fábula que vuela hacia atrás en círculos de radio decreciente hasta que ¡zas!, desaparece por su propia parte posterior. Dónde puede ir a parar y qué le puede suceder después son meras especulaciones de las que vamos a tratar en el último capítulo.

XII. EL PRINCIPIO Y EL FIN

Supongamos que tenemos una película del Cosmos en expansión y que la pasamos hacia atrás. Es evidente que debe haber habido un momento, en lo que Shakespeare llamó "el oscuro descenso a los abismos del tiempo", en que una enorme cantidad de materia estuvo concentrada en un espacio muy reducido. Quizá, hace muchos miles de millones de años, una explosión primigenia desencadenó todo el proceso. Éste es el concepto del *Big Bang* ("la gran explosión"), que fue propuesto por primera vez por Lemaître (ver capítulo 10) y que encontró su más férreo defensor en la figura de George Gamow.

Gamow escribió un persuasivo libro, *The Creation of the Universe,* en defensa de esta teoría. Lemaître pensaba que el *Big Bang* se produjo hace aproximadamente cinco mil millones de años. Sin embargo, en los últimos años las estimaciones de la edad del Universo también se encuentran en expansión. En la actualidad, parece que quince o veinte mil millones de años constituyen una mejor conjetura. En cualquier caso, Gamow supone que hubo una época en que toda la materia del Universo estaba concentrada en una gota uniforme de materia increíblemente densa a la que llamó *hyle* (palabra griega que quiere decir materia prima). ¿Cómo llegó el *hyle* hasta allí? Gamow pensaba que antes había formado



parte de un universo en *contracción*. Este período de gran compresión es, evidentemente, un período sobre el que es difícil obtener información. Al igual que en el modelo de Lemaître, el modelo de Gamow se inicia realmente con una explosión. Es lo que se suele llamar "el instante de la creación" (no en el sentido de crear algo de la nada, sino en el sentido de dar forma a algo carente de ella). Si preferimos creer en una creación a partir de la nada, *éste* es un buen momento, en la teoría de Gamow, para tomarlo como el instante de la creación.

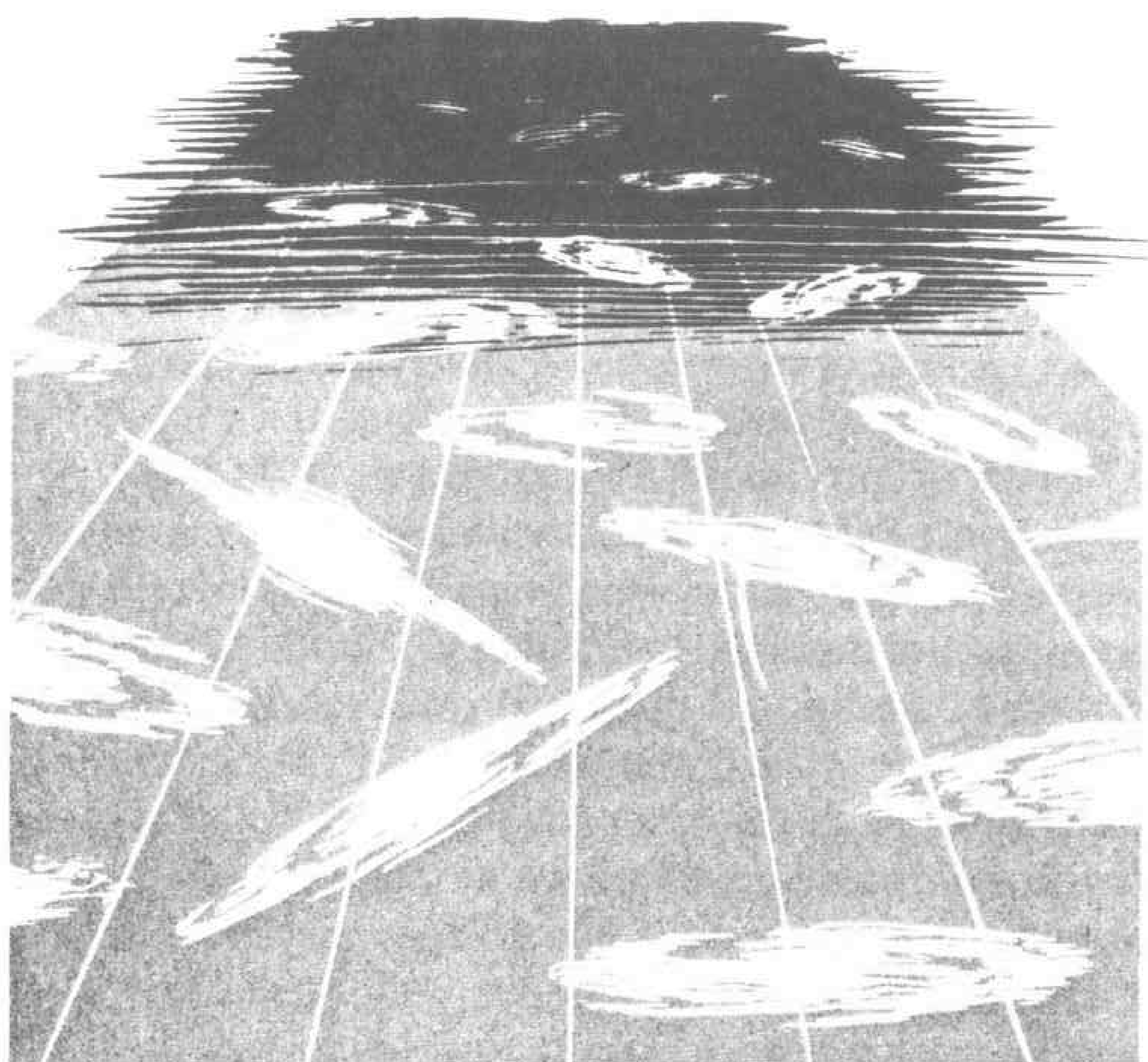
Justo antes del *Big Bang*, la temperatura y la presión del *hyle* eran increíblemente altas. Entonces ocurrió la monstruosa e inimaginable explosión. El libro de Gamow proporciona todos los detalles de lo que pudo haber sucedido después. Con el tiempo se formaron las estrellas por agregación del polvo y el gas expansivos. La expansión actual del Universo es la continuación del movimiento impartido a la materia por

la explosión inicial. Gamow creía que este movimiento nunca se detendría.

En 1961, cuando escribí la primera edición de este libro, el principal rival de la teoría del *Big Bang* era el modelo del Universo del estado estacionario, propuesto en 1948 por tres científicos de la Universidad de Cambridge: Hermann Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle. La defensa más persuasiva de *esta* teoría la constituye el popular libro, del propio Hoyle, *The Nature of the Universe*. Al igual que en la teoría de Gamow, la teoría del estado estacionario acepta la expansión del Universo y supone que el espacio es abierto e infinito (al contrario que en el modelo de Eddington, donde se supone que el espacio es cerrado). A diferencia de la teoría de Gamow, el Universo no comienza con una explosión. De hecho, no tiene ningún principio. No es casualidad que la única diferencia entre los títulos de los libros de Gamow y Hoyle está en una sola palabra. En el cosmos de Hoyle no hay ningún instante de la "creación"; más bien hay, como veremos, un número infinito de pequeñas creaciones. En palabras de Hoyle: «Cada cúmulo galáctico, cada estrella, cada átomo, tuvo un comienzo, pero no lo tuvo el Universo mismo. El Universo es algo más que la suma de sus partes, lo cual quizá sea una inesperada conclusión*.»

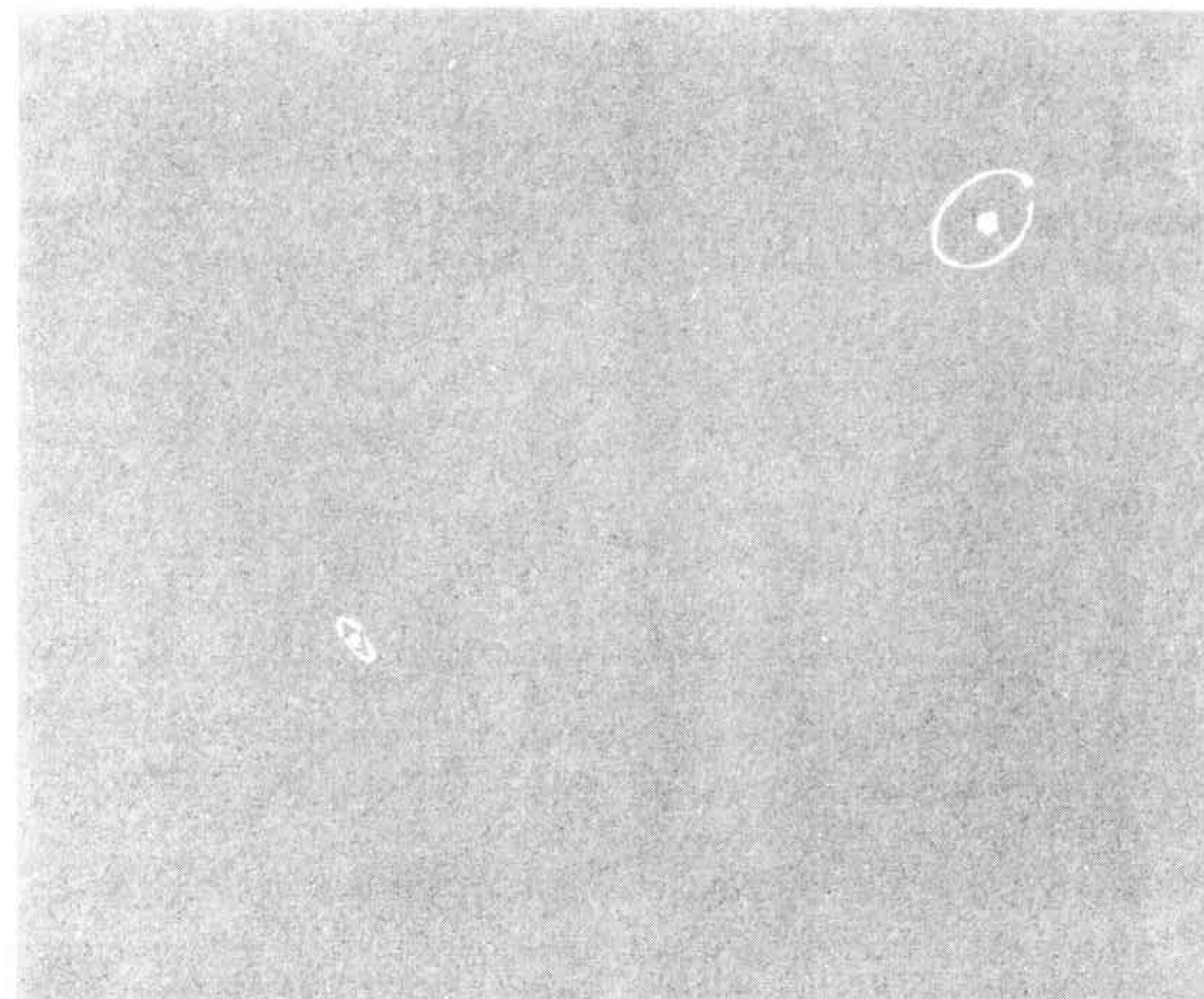
El Universo estacionario siempre ha funcionado del mismo modo que en la actualidad. Si nos remontáramos en el tiempo cientos de billones de años atrás, encontraríamos en cualquier parte del Cosmos el mismo tipo de galaxias evolucionando de la misma manera, conteniendo el mismo tipo de estrellas de todas las edades, algunas con el mismo tipo de planetas girando a su alrededor y, probablemente, en algunos de estos planetas encontraríamos tipos de vida semejantes a

* Fred Hoyle, *Frontiers of Astronomy* (Nueva York: New American Library, 1957), página 284.



los de la Tierra. Tal vez haya una infinidad de planetas en los que en este mismo instante (signifique lo que signifique) criaturas inteligentes estén enviando sus primeros astronautas al espacio. Así, según este modelo, el Cosmos, a grandes rasgos, es uniforme, no sólo en un espacio infinito sino también a lo largo de un tiempo infinito.

Según el modelo del estado estacionario, el Universo se está expandiendo, pero esta expansión no es una secuela de la explosión original, sino que es debida a una fuerza repulsiva análoga a la abandonada constante cosmológica de Einstein. Quizá, como sostienen algunos defensores de esta teoría, la fuerza esté causada por la diferencia entre las cargas positivas de los protones y las cargas negativas de los electrones. Los átomos, hasta ahora considerados neutros eléctricamente, se-



rían portadores de una diminuta carga y, dado que cargas iguales se repelen, el Universo tendría tendencia a expandirse. Cualquiera que sea la naturaleza de la fuerza repulsiva, alejaría las galaxias hasta que finalmente se desvanecieran más allá del "borde", cuando sobrepasaran la barrera de la luz. Esta desaparición se produciría, sin duda, respecto de un observador en nuestra galaxia. Cuando un observador en la Tierra ve que la galaxia X y sus vecinas desaparecen, los observadores en la galaxia X ven a *nuestra* galaxia hacer exactamente lo mismo.

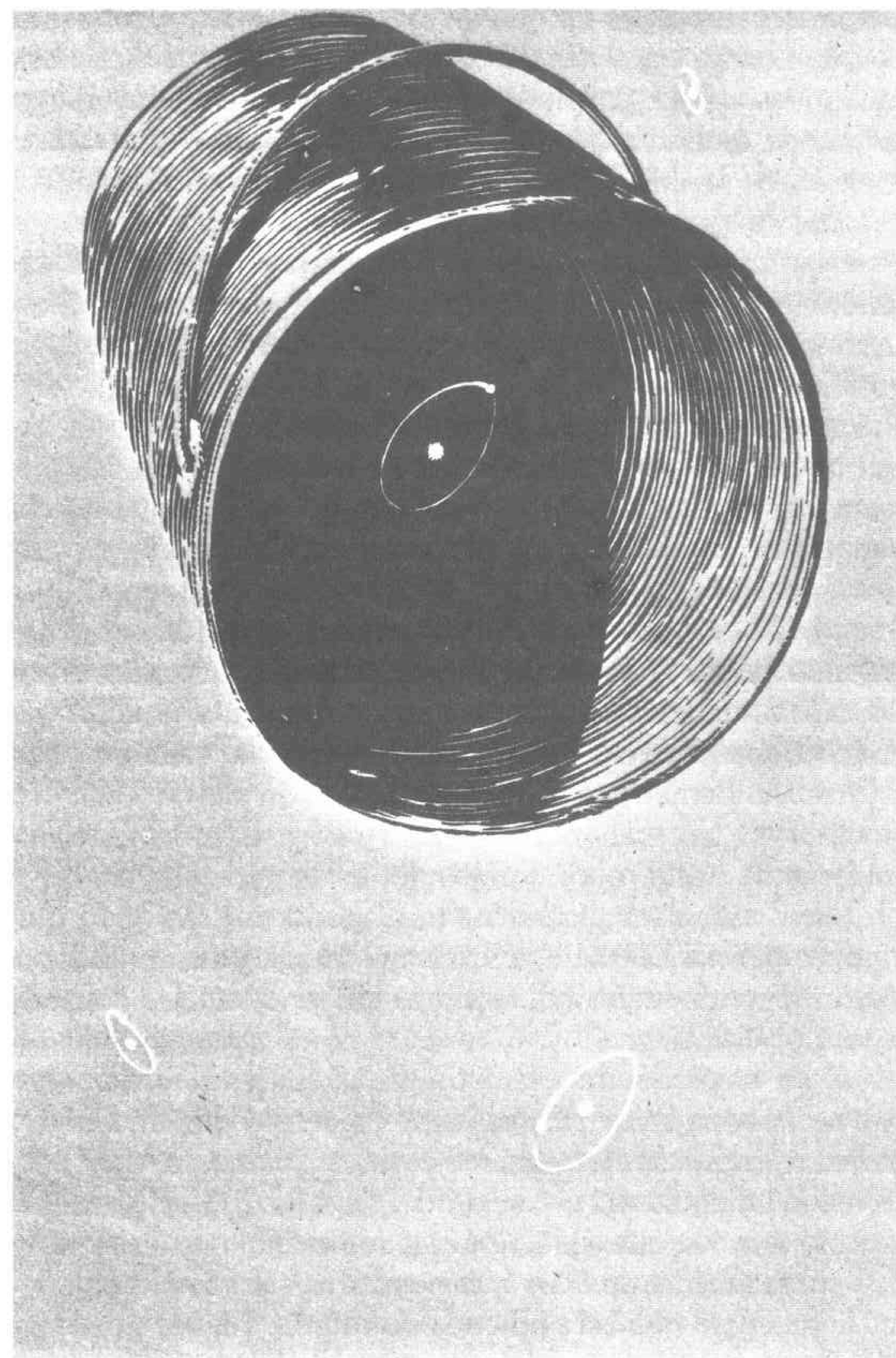
Queda por aclarar una cuestión muy importante: si el Universo ha estado expandiéndose siempre y si continúa haciéndolo indefinidamente, ¿por qué no disminuye su densidad? Evidentemente, no existe ningún medio de mantener el

estado estacionario sin suponer la creación continua de materia, quizás en forma de hidrógeno, el más simple de los elementos. De acuerdo con Hoyle, la aparición de un solo átomo de hidrógeno por cada cubo de materia cada diez millones de años bastaría para mantener el cosmos estacionario (es prácticamente imposible hablar de la concepción de Hoyle sin ser indulgentes con sus evidentes juegos de palabras). Naturalmente, el ritmo de creación de la materia debe ser precisamente el necesario para contrarrestar la disminución de densidad.

¿De dónde vienen los átomos de hidrógeno? Nadie pretende saberlo. Éste es el punto de partida en la teoría de Hoyle. Si creemos en una creación a partir de la nada, *éste* es el punto en la teoría del estado estacionario donde la creación tiene lugar, o mejor dicho, donde está teniendo lugar constantemente.

En 1961, las dos teorías rivales, la teoría del *Big Bang* y la del estado estacionario, iban parejas. No se conocían los valores de los parámetros pertinentes (valores que debían asignarse a ciertas variables para la construcción de los modelos) con la precisión suficiente para decidir entre las dos teorías. La teoría de la relatividad es igualmente aplicable a ambas y las dos encajaban bien con los hechos conocidos sobre el Universo (más precisamente, con lo que *se pensaba en aquel tiempo* que eran los hechos). Sin embargo, en cosmología "los hechos" son difíciles de obtener y las estimaciones de los parámetros deben modificarse continuamente. En los años cincuenta, los astrónomos partidarios de ambas teorías escribían libros y artículos que daban la impresión de que todas las pruebas estaban de su parte, mientras que no había demasiados datos a favor de la teoría de sus oponentes, obstinados y pasados de moda.

El término *Big Bang* fue acuñado por Hoyle como mofa. En su libro lo llamó una "vieja idea" que consideraba «insatis-



factoria incluso antes de que un examen más detallado muestre que conduce a serias dificultades, puesto que cuando observamos nuestra propia galaxia no encontramos el menor indicio de que tal explosión haya tenido lugar». En el último capítulo de la edición de 1960 de su libro, revisada muy a fondo, Hoyle especuló sobre la imposibilidad de que futuras observaciones llegaran a desacreditar la teoría del estado estacionario. «¿Es posible que algún nuevo y sorprendente descubrimiento nos esté esperando a la vuelta de la esquina? ¿Es posible que la cosmología de dentro de 500 años revolucione nuestras ideas del mismo modo que nuestra cosmología actual ha convertido en obsoleta la de Newton? Quizá les sorprenda escuchar que dudo mucho de que esto llegue a ocurrir.» Como alguien dijo en una ocasión, los cosmólogos casi siempre están equivocados, pero casi nunca inseguros.

Mirando ahora hacia atrás fríamente, se puede ver el importante papel que a veces desempeñan las actitudes emocionales (muchas veces de manera inconsciente) en el desarrollo del pensamiento científico. Para muchas personas hay algo profundamente turbador en la noción de un Universo que irrumpe tras una gran explosión y luego se expande indefinidamente hasta morir congelado; estas personas, en cambio, encuentran tranquilizador y acogedor un Universo que siempre permanece igual a sí mismo. Hoyle y sus seguidores fueron muy elocuentes al expresar sus preferencias emocionales por este último.

Para otros ocurre exactamente al revés. Hay personas que no pueden imaginar nada más espantoso que un Universo que se expande eternamente y que, no obstante, es el mismo en la infinidad del espacio y del tiempo. G. K. Chesterton escribió una vez que, si la inmortalidad existe, quizá sea parte de la misericordia de Dios que nos la haya cortado en pedazos finitos para que así podamos disfrutarla. Tal vez el propio Dios, deseando disfrutar del espectáculo de la historia cósmica, tuvo que cortarla como una cinta en trozos finitos. En cualquier caso, Gamow fue igualmente franco acerca de sus preferencias emocionales por el *Big Bang*. ¿No será que la cultura estadounidense, nacida de una revolución reciente, incline a los astrónomos de los Estados Unidos hacia un comienzo revolucionario del Universo? Teller sugirió una vez que la teoría del estado estacionario era la teoría dominante en Inglaterra no solamente porque era obra de cosmólogos británicos, sino porque expresaba el deseo británico de mantener su *statu quo* en el mundo.

De pronto, a mediados de los años sesenta, a Hoyle le sucedió algo curioso cuando se dirigía a su observatorio. Su teoría del estado estacionario se desvaneció como una galaxia que se esfuma en el borde óptico del Universo. El primer golpe importante a su teoría se lo asestó el descubrimiento de los quasars. Suponiendo que sus desplazamientos hacia el rojo no se deban a causas poco convencionales, tienen que ser estructuras que sólo existen en las regiones más alejadas del Cosmos. Esto quiere decir que se formaron hace miles de millones de años y que, desde entonces, no se ha formado ninguno más. Pero entonces la teoría del estado estacionario no puede dar cuenta de ellos.

El golpe más duro, la estocada de gracia a la teoría del estado estacionario, se lo asestó en 1965 el descubrimiento de que el Universo se encuentra inmerso en un mar de ondas de alta frecuencia en la frontera divisoria entre las emisiones de microondas y la luz infrarroja. Esta radiación se suele denominar "radiación del cuerpo negro" debido a que los cuerpos negros a temperaturas extremadamente bajas emiten ondas de radio de esta clase. La única manera de explicar esta radiación era suponiendo que se trataba del remanente de la gran llamarada de luz proveniente de la bola de fuego primigenia.

La radiación infrarroja fue descubierta independiente-

mente por científicos de los Laboratorios Bell en Nueva Jersey y por físicos de la Universidad de Princeton. Robert Dicke, un físico de esta última, fue quien propuso por primera vez que se buscara esta radiación, y cuando sus colaboradores la detectaron lo hicieron con ayuda de un radiómetro que el propio Dicke había diseñado. Fue una coincidencia notable que los dos equipos de científicos —que, aunque trabajaban en laboratorios muy próximos, no estaban al corriente del trabajo del otro— descubrieran la radiación de microondas casi al mismo tiempo.

La existencia del "mar" de radiación está fuera de toda duda. Tiene una temperatura de unos 3 grados en la escala absoluta; se trata, por tanto, de un tenue rubor electromagnético, un mero "murmullo" procedente del estruendo del *Big Bang*. En el momento de la explosión las ondas debían tener longitudes de onda muy cortas, pero se han ido ensanchando a medida que el Universo se expandía durante los pasados quince o veinte mil millones de años.

La característica más sobresaliente de esta radiación de microondas es su "isotropía", esto es, su uniformidad en todas las direcciones espaciales. Esto elimina la posibilidad de que la radiación de cuerpo negro provenga de una única y desconocida fuente. Si así fuera, no podría ser isotrópica. La isotropía es tan uniforme que por primera vez los astrónomos cuentan con un medio de medir el movimiento "absoluto" de la Tierra. Como hemos visto, la Tierra se mueve alrededor del Sol, el Sol se mueve a través de la Vía Láctea, la Vía Láctea gira y se mueve a través de un cúmulo galáctico y el cúmulo pertenece a un supercúmulo que cuenta con unas 2.500 galaxias. Ahora que sabemos que el Universo está bañado uniformemente por la radiación de microondas, podemos emplear el efecto Doppler para medir el movimiento de la Tierra con respecto a esta radiación. Basta con medir el corrimiento hacia el rojo en distintas direcciones. En la actualidad se están

llevando a cabo algunos intentos en este sentido, aunque todavía no se ha llegado a ninguna conclusión definitiva.

La razón de que pusiera "absoluto" entre comillas en el párrafo anterior es que el movimiento que mediríamos sería relativo al mayor sistema de referencia que conocemos, el propio Universo. No se debe suponer que esto viola de ninguna manera la teoría de la relatividad. Sería igualmente legítimo suponer que la Tierra está fija y que el Universo entero, con toda su gran nube esférica de radiación de cuerpo negro, es el que se está moviendo. Las ecuaciones son las mismas. En efecto, desde el punto de vista de la relatividad, la elección del sistema de referencia es arbitraria. Naturalmente, es más sencillo suponer que el Universo está fijo y que la Tierra se mueve, y no al contrario, pero los dos modos de hablar del movimiento relativo de la Tierra son dos modos distintos de decir lo mismo.

Los defensores de la teoría del estado estacionario se resistieron a abandonarla, pero al final tuvieron que rendirse a la evidencia. Dennis Sciama se expresó de manera emotiva. «Tengo que añadir que para mí», escribió en *Scientific American* (septiembre, 1967), «el abandono de la teoría del estado estacionario ha sido motivo de gran tristeza. La teoría del estado estacionario tiene un rango y una elegancia que por alguna razón inexplicable han pasado inadvertidos al arquitecto del Universo. El Universo es una obra chapucera, pero me temo que no nos queda más remedio que aprovecharlo lo mejor que sepamos.»

La mayor de las chapuzas, sigue diciendo Sciama, la constituye el propio *Big Bang*. Fue precisamente la voluntad de evitar esta "incómoda singularidad", escribe, lo que condujo a la teoría del estado estacionario. En una ocasión en que Sciama estaba invitado en un almuerzo ofrecido por la redacción de la revista *Scientific American*, muy poco antes de que él escribiera dicho artículo, le escuché decir que durante años

había estado intentando "zafarse" de las pruebas abrumadoras en favor de la "incómoda singularidad" hasta que, finalmente, se le acabaron las "evasivas".

Hoyle no parece haber abandonado totalmente la esperanza. Durante años ha propuesto varias alternativas, algunas de ellas fantásticas. Casi cada año presenta una nueva idea encaminada a asignar algún tipo de estado estacionario a las cosas, aunque, por descontado, no en la forma de su enterrada teoría. Estas especulaciones hoyleanas no son tomadas en serio por los partidarios del *Big Bang*. George P. Thomson criticó a Hoyle en una ocasión por su propensión a inventar nuevas leyes que encajaran con sus teorías. Dijo: «Existen muchas maneras de resolver problemas de ajedrez si uno se permite inventar nuevas reglas para mover las piezas.»

El hecho de que el *Big Bang* haya ganado no quiere decir que exista un acuerdo total entre los cosmólogos. En absoluto. Simplemente quiere decir que los contendientes han cambiado de táctica. Casi todos los expertos coinciden en que el Universo se está expandiendo, en que no está entrando nueva materia procedente de otros espacios y en que se originó en una monstruosa explosión que tuvo lugar hace unos quince o veinte mil millones de años.

Las dos preguntas clave que quedan sin responder corresponden al principio y al fin. ¿Qué ocurrió antes de la explosión? y ¿qué le ocurrirá en un futuro lejano a este Universo en expansión?

Se pueden construir todo tipo de modelos, pero para decidirnos por alguno de ellos es necesario disponer de más información sobre los parámetros fundamentales. El parámetro decisivo es la masa total del Cosmos. ¿Existe masa suficiente para detener la expansión y obligar al Universo a ir en la otra dirección? Los intentos más recientes que se han efectuado para calcular esta masa dan un valor muy inferior al necesario para detener la expansión y muy inferior también al

necesario para "cerrar" el espacio-tiempo según el modelo original de Einstein o la versión modificada de Eddington. Por más que lo intenten, los astrónomos son incapaces de justificar la existencia de más de un 10 % de la masa necesaria. Si estas estimaciones son correctas, el Universo abierto se seguirá expandiendo indefinidamente hasta que finalmente disipe toda su energía y muera de frío*.

Los cosmólogos que se niegan a aceptar que el Universo tenga un destino glacial tan lamentable, están obligados a suponer que en algún lugar se encuentra una "masa oculta" suficiente para cerrar el espacio-tiempo y detener finalmente la expansión. Se han propuesto muchas teorías para indicar dónde se encuentra escondida esta masa. La última, y una de las más exóticas, es que se encuentra en el interior de millones de agujeros negros en miniatura que se formaron en el instante de la gran explosión.

Supongamos que la masa existe y que, por tanto, el Universo sufrirá una fase de contracción. Una vez iniciada la contracción, no existe ningún medio de detenerla. Llegará un momento en que la contracción degenerará en un desplome catastrófico y el Universo entrará en la singularidad de un agujero negro. Nadie sabe cómo evitar la singularidad, el negro abismo en que la densidad del Cosmos se hace infinita y la materia se aplasta hasta desaparecer.

A algunos cosmólogos les gusta pensar que el resultado final de tan monstruosa contracción es una nueva bola de fuego. La nueva explosión arrojaría el hidrógeno al espacio como antes y con el tiempo se condensaría en nuevas galaxias, repitiéndose el proceso indefinidamente. Éstos son los llamados modelos "pulsantes" u "oscilantes". La idea fue desarrollada independientemente como teoría seria en 1919 por Howard P. Robertson y Richard C. Tolman. Desde luego,

---

* Véase el artículo de J. Richard Gott III, James E. Gunn, David N. Schramm y Beatrice M. Tinsley, "¿Expansión indefinida del Universo?", *Investigación y Ciencia* (octubre, 1976).

una concepción de este tipo, sin estar apoyada por los datos experimentales, es mucho más antigua. Subyace en el concepto del eterno retorno que forma parte de muchas religiones orientales. Brahma, el dios creador hindú, inhala y exhala universos a través de su nariz mientras Shiva, bailando dentro de un círculo de fuego, los hace aparecer y desaparecer a su antojo. Visiones similares han sido defendidas por unos cuantos filósofos occidentales. Los antiguos estoicos enseñaron que el Universo sigue ciclos sin fin, de manera que cada uno acaba disolviéndose en una bola de fuego. Nietzsche estaba obsesionado por la misma noción, el eterno retorno, y lo defendió poéticamente en su libro *Así hablaba Zaratustra*.

Los universos oscilantes pueden ser infinitos en número, tanto si son estructuras cerradas dentro de un espacio-tiempo de cinco dimensiones, aisladas entre sí como pompas de jabón, como si son mundos paralelos en un espacio-tiempo de orden superior. Esto conduce a un nuevo tipo de estado estacionario*. El superespacio crea burbujas constantemente. En los últimos años, el propio Hoyle se ha visto atraído por esta concepción, aunque ha sido Wheeler quien la ha presentado con la mayor sofisticación matemática.

Según Wheeler, nuestro espacio-tiempo es como un punto en un espacio inimaginablemente vasto. De vez en cuando una porción de superespacio se enreda en un nudo complicado y se produce una explosión que crea un Universo de tres dimensiones espaciales. Diversos factores aleatorios pueden afectar a esta explosión, de manera que cada vez que nace un universo lo hace con su propio conjunto particular de cons-

* Si nos remontamos a las cosmologías que precedieron el descubrimiento de la expansión del Universo, vemos que ha habido muchos modelos de "estado estacionario", empezando con el de Aristóteles. W. D. Macmillan, el astrónomo de Chicago que no aceptaba la teoría de la relatividad (ver capítulo 9), tenía una teoría de estado estacionario no relativista en la que el corrimiento de las galaxias hacia el rojo era causado por la evaporación de luz en el espacio que volvía a emerger en forma de átomos e hidrógeno. En su sentido moderno, el término "estado estacionario" se circunscribe a las teorías relativistas que tienen en cuenta la expansión del Universo.

tantes, partículas y leyes. Constantemente surgen una infinidad de universos diferentes de breve existencia. Primero se expanden, pasando posteriormente a contraerse hasta caer en el olvido. Vivimos en un Universo que estalló precisamente del modo adecuado para dar lugar a las partículas y las leyes que permitieron que ciertas complicadas estructuras (nosotros) evolucionaran de tal forma que fueran capaces de contemplarse a sí mismas.

Como nota histórica curiosa añadiré que Edgar Allan Poe tuvo precisamente esta visión. La describió en su última obra publicada, un pequeño pero notable libro, *Eureka,* que apareció en 1848. Por aquel entonces, la cosmología de Poe parecía muy extraña a sus contemporáneos. Hoy día el libro parece haber sido escrito por uno de los alumnos de Wheeler.

Un universo comienza, dice Poe, cuando Dios crea una "partícula primordial" de la nada. A partir de ella, la materia se "irradia" esféricamente en todas direcciones, con un «un número inexpresablemente grande pero finito de átomos inimaginablemente pero no infinitamente pequeños». A medida que el Universo se expande, la gravedad lentamente va ganando la partida y la materia se condensa (como en la hipótesis nebular de Laplace, de la cual Poe era un ferviente admirador) para formar estrellas y planetas. Esta teoría, escribió Poe (en una frase que aparece muy a menudo cuando se habla de la teoría de la relatividad), es demasiado bella para no ser cierta.

Nuestro Universo, de acuerdo con Poe (quien vuelve a plantear la paradoja de Olbers) es finito, de lo contrario el cielo resplandecería con la luz de las estrellas. Sin embargo, sólo es uno más entre una infinidad de universos; los otros se encuentran a una "distancia tan inenarrable" que ninguna señal luminosa puede transmitirse entre ellos. Estas burbujas cósmicas están siempre aisladas unas de otras, de modo que

es imposible que una inteligencia en un universo pueda apercibirse de la existencia de otra inteligencia en otro universo distinto. Cada cosmos tiene su propio dios.

Con el tiempo, la gravedad detiene la expansión y el cosmos empieza a contraerse. Finalmente, toda la materia regresa a su unidad original; esto es, se convierte de nuevo en nada. La burbuja desaparecerá instantáneamente. La deidad iniciará entonces una nueva creación con (y es aquí donde Poe recuerda tanto a Wheeler) «una nueva y quizá totalmente distinta serie de condiciones». Este proceso cíclico «continúa para siempre; nace un universo que crece y que se hunde después en la nada a cada latido del corazón divino».

El universo pulsante de Poe es en la actualidad el modelo favorito de muchos cosmólogos. Existen, por descontado, otros modelos, algunos propuestos seriamente, otros en broma. Hoyle dijo en una ocasión que había inventado docenas de modelos tan extraños que nunca se atrevió a publicarlos, aunque cada uno de ellos era consistente con las estimaciones presentes de los parámetros pertinentes. Hay modelos en los que el espacio se dobla sobre sí mismo como una banda de Möbius (una superficie de una sola cara que se forma dando media vuelta a una cinta de papel y pegando los extremos). Si se viaja alrededor de este universo, uno vuelve a encontrarse en el punto de partida, con la diferencia de que todo ha quedado invertido como en un espejo. Desde luego se puede dar otra vuelta y todo vuelve a quedar como antes. El matemático Kurt Gödel publicó en 1949 un extraño modelo sin expansión en el cual cada punto del espacio gira de la misma manera alrededor de un eje. Todos los ejes son paralelos, y a un observador situado en cualquier punto el universo le parece estar girando a su alrededor en la misma dirección.

El modelo de la "relatividad cinemática" del astrónomo Edward A. Milne de la Universidad de Oxford es quizás el más extraño de todos. Introduce dos clases de tiempo esencialmente diferentes. En términos de un tiempo, el Universo es de edad y tamaño infinitos y no se expande en absoluto. En términos del otro tiempo, es de tamaño finito y se ha estado expandiendo únicamente desde el momento de la creación. Es sólo una cuestión de conveniencia elegir el tiempo que se considera fundamental.

El matemático inglés Edmund Whittaker* propuso en una ocasión (en broma) una teoría según la cual nuestro Cosmos finito se contrae en la actualidad y la materia desaparece continuamente por el sitio por donde entra según la teoría de Hoyle. El mundo con el tiempo desaparecerá completamente. «Este mundo tiene la ventaja», escribe Whittaker, «de proporcionar una imagen muy sencilla del destino final del Universo.» Sin duda, esta teoría debería explicar por qué vemos un corrimiento galáctico hacia el rojo en lugar de un desplazamiento hacia la región violeta del espectro, pero esto no es especialmente difícil de justificar. Todo lo que tenemos que hacer es tomar prestado uno de los aparatos de De Sitter y suponer que el tiempo corre más deprisa. (Como ha señalado mi amigo Sidney Margulies, esto podría explicar por qué cuando uno se hace mayor le parece que los años pasan como si fueran meses: de hecho, pasan como meses.) La luz que llega a la Tierra procedente de una galaxia lejana sería entonces luz de la galaxia tal como era millones de años atrás, cuando la luz vibraba más despacio. Esto podría producir un desplazamiento hacia el rojo suficientemente grande para compensar el corrimiento Doppler hacia el violeta. Desde luego que, cuanto más alejada estuviera la galaxia, tanto más vieja y rojiza parecería.

El hecho de que pueda construirse un modelo según el

* Sir Edmund Whittaker escribió una obra en dos volúmenes con el título *History of the Theories of Aether and Electricity* (1900-1926). Se trata de una valiosa obra monumental, malograda, sin embargo, por un curioso empeño en minimizar las contribuciones de Einstein. A lo largo de toda la obra se considera la teoría de la relatividad como una creación de Lorentz.

cual el Universo se está haciendo más pequeño da una idea de lo flexibles que son las ecuaciones de la teoría de la relatividad. Pueden adaptarse a diferentes modelos cosmológicos que encajan bastante razonablemente con todo lo que se ha podido observar hasta el presente. Es interesante descubrir que el filósofo inglés Francis Bacon escribió en 1620 en su *Novum Organum:* «Se pueden hacer muchas hipótesis sobre los cielos, todas diferentes entre sí y, sin embargo, con suficiente concordancia con los fenómenos observados.» La cosmología moderna no ha cambiado en este sentido, aunque el número de fenómenos observados es mucho mayor; por tanto, existen razones fundadas para suponer que los modelos modernos están más próximos a la verdad que los antiguos. Y, por otro lado, no existe ninguna duda de que dentro de cien años los modelos cosmológicos basados en datos astronómicos que ahora no poseemos serán muy distintos de cualquier modelo cosmológico considerado seriamente en nuestros días.

Es con esta humilde reflexión en el pensamiento con la que tantos escritores de libros populares sobre cosmología moderna, desde Eddington hasta Sciama, han citado el siguiente párrafo extraído del libro VIII del *Paraíso perdido* de John Milton. El arcángel San Rafael se dirige a Adán y Eva. Nótese que la relatividad del movimiento de la Tierra se da por supuesta.

«No te censuro por tus preguntas y tu ansia
de saber; porque el cielo
es como el libro de Dios abierto ante tus ojos,
para que leas sus obras asombrosas, y puedas aprender
las estaciones y el paso de las horas, los días, los meses
y los años.
Si es la Tierra o es el cielo el que se mueve,
poco importa para ser exacto en tus cálculos; en su sabiduría

el Altísimo Arquitecto lo ha ocultado al hombre y al ángel,
no divulgando sus secretos a aquellos que mejor harían
admirándolos.
O, si prefieren perderse en
conjeturas, Dios ha expuesto libremente la máquina celeste
a sus discusiones,
quizá para reírse de sus diversas opiniones extravagantes
que deduzcan al atreverse incluso a modelar el mismo cielo
y contar el número de sus estrellas.»

El escritor irlandés Lord Dunsany (en su libro *The Man Who Ate the Phoenix)* cuenta que Atlas explica al propio Dunsany lo que ocurrió el día en que la ciencia hizo que dejara de ser posible para los mortales seguir creyendo en el viejo modelo griego del Universo. Atlas admite que encontraba su tarea un tanto aburrida y desapacible. Tenía frío porque su nuca estaba en contacto con el Polo Sur de la Tierra, y sus manos estaban siempre mojadas puesto que las tenía metidas en los dos océanos. Sin embargo, siguió en su puesto hasta que la gente dejó de confiar en él.

Entonces el mundo, sigue diciendo Atlas con tristeza, empezó a ser "demasiado científico". Al ver que ya nadie lo necesitaba, dejó de sostener al mundo y se marchó.

«Sí», dice Atlas, «no sin antes haberlo meditado, meditado muy a fondo. Pero cuando lo hice, debo decir que me quedé muy sorprendido; profundamente sorprendido de lo que ocurrió.»

«¿Y qué ocurrió?»

«Sencillamente, nada. Nada en absoluto.»

En este libro he intentado explicar lo que sucedió en una ocasión más reciente, cuando el dios newtoniano del Movimiento Absoluto, después de ser aguijoneado un par de veces por Einstein, abandonó la Tierra y se marchó. A la Tierra no le ocurrieron demasiadas cosas dignas de mención, al menos durante un tiempo. Continuó girando sobre su eje, achatán-



dose por los polos y dando vueltas alrededor del Sol. Sin embargo, algo le sucedió a la física. Su capacidad de explicar, su capacidad de predecir y, por encima de todo, su capacidad de alterar la faz de la Tierra, se hicieron mayores de lo que nunca antes había sido posible. Para bien o para mal.

BIBLIOTECA CIENTÍFICA SALVAT

1. **Stephen Hawking.** *Una vida para la ciencia.* Michael White y John Gribbin
2. **La verdadera historia de los dinosaurios.** Alan Charig
3. **La explosión demográfica.** *El principal problema ecológico.* Paul R. Ehrlich y Anne H. Ehrlich
4. **El monstruo subatómico.** *Una exploración de los misterios del Universo.* Isaac Asimov
5. **El gen egoísta.** *Las bases biológicas de nuestra conducta.* Richard Dawkins
6. **La evolución de la física.** Albert Einstein y Leopold Infeld
7. **El secreto del Universo.** *Y otros ensayos científicos.* Isaac Asimov
8. **Qué es la vida.** Joël de Rosnay
9. **Los tres primeros minutos del Universo.** Steven Weinberg
10. **Dormir y soñar.** *La mitad nocturna de nuestras vidas.* Dieter E. Zimmer
11. **El hombre mecánico.** *El futuro de la robótica y la inteligencia humana.* Hans Moravec
12. **La superconductividad.** *Historia y leyendas.* Sven Ortoli y Jean Klein
13. **Introducción a la ecología.** *De la biosfera a la antroposfera.* Josep Peñuelas
14. **Miscelánea matemática.** Martin Gardner
15. **El Universo desbocado.** *Del Big Bang a la catástrofe final.* Paul Davies
16. **Biotecnología.** *Una nueva revolución industrial.* Steve Prentis
17. **El telar mágico.** *El cerebro humano y la computadora.* Robert Jastrow
18. **A través de la ventana.** *Treinta años estudiando a los chimpancés.* Jane Goodall
19. **Einstein.** Banesh Hoffmann
20. **La doble hélice.** *Un relato autobiográfico sobre el descubrimiento del ADN.* James Watson
21. **Cien mil millones de soles.** *Estructura y evolución de las estrellas.* Rudolf Kippenhahn
22. **El planeta viviente.** *La adaptación de las especies a su medio.* David Attenborough
23. **Evolución humana.** Roger Lewin
24. **El divorcio entre las gaviotas.** *Lo que nos enseña el comportamiento de los animales.* William Jordan

25. **Lorenz.** Alec Nisbett
26. **Mensajeros del paraíso.** *Las endorfinas, drogas naturales del cerebro.* Charles F. Levinthal
27. **El Sol brilla luminoso.** Isaac Asimov
28. **Ecología humana.** *La posición del hombre en la naturaleza.* Bernard Campbell
29. **Sol, lunas y planetas.** Erhard Keppler
30. **Los secretos de una casa.** *El mundo oculto del hogar.* David Bodanis
31. **La cuarta dimensión.** *Hacia una geometría más real.* Rudy Rucker
32. **El segundo planeta.** *El problema del aumento de la población mundial.* U. Colombo y G. Turani
33. **La mente (I).** Anthony Smith
34. **La mente (II).** Anthony Smith
35. **Introducción a la química.** Hazel Rossotti
36. **El envejecimiento.** David P. Barash
37. **Edison.** Fritz Vögtle
38. **La inestable Tierra.** *Pasado, presente y futuro de las catástrofes naturales.* Basil Booth y Frank Fitch
39. **Gorilas en la niebla.** *13 años viviendo entre los gorilas.* Dian Fossey
40. **El espejo turbulento.** *Los enigmas del caos y el orden.* John Briggs y F. David Peat
41. **El momento de la creación.** *Del Big Bang hasta el Universo actual.* James S. Trefil
42. **Dios y la nueva física.** Paul Davies
43. **Evolución.** *Teorías sobre la evolución de las especies.* Wolfgang Schwoerbel
44. **La enfermedad, hoy.** Lluís Daufí
45. **Iniciación a la meteorología.** Mariano Medina
46. **Los niños de Urania.** *En busca de las civilizaciones extraterrestres.* Evry Schatzman
47. **Amor y odio.** *Historia natural del comportamiento humano.* Irenäus Eibl-Eibesfeldt
48. **Matemáticas e imaginación (I).** Edward Kasner y James Newman
49. **Matemáticas e imaginación (II).** Edward Kasner y James Newman
50. **Darwinismo y asuntos humanos.** Richard Alexander
51. **La explosión de la relatividad.** Martin Gardner

EX LIBRIS Scan Digit



The Doctor

Libros, Revistas, Intereses:
http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/









El mundo de los astrónomos y de los físicos ha acogido con sobresalto los recientes descubrimientos de quasars, pulsars y agujeros negros. Ello ha hecho que se incrementara también el interés por la teoría de la relatividad, íntimamente ligada a estos fenómenos astronómicos.
En esta obra, Martin Gardner nos invita, de forma clara, amena y brillante, a un «paseo» por el Universo tal y como nos lo muestran las teorías de Einstein.

Martin Gardner es uno de los más célebres escritores sobre temas científicos. Durante más de veinte años, Gardner ha tenido a su cargo una sección de matemática en *Scientific American*, la revista de divulgación científica más leída en el mundo. Entre sus numerosos libros, *Miscelánea matemática* y una antología de textos, *El escarabajo sagrado*, forman parte de la Biblioteca Científica Salvat.

La explosión de la relatividad

M. Gardner

51





La explosión de la relatividad

Martin Gardner

Biblioteca
Científica
Salvat



El mundo de los astrónomos y de los físicos ha acogido con sobresalto los recientes descubrimientos de quasars, pulsars y agujeros negros. Ello ha hecho que se incrementara también el interés por la teoría de la relatividad, íntimamente ligada a estos fenómenos astronómicos.
En esta obra, Martin Gardner nos invita, de forma clara, amena y brillante, a un «paseo» por el Universo tal y como nos lo muestran las teorías de Einstein.

Martin Gardner es uno de los más célebres escritores sobre temas científicos. Durante más de veinte años, Gardner ha tenido a su cargo una sección de matemática en *Scientific American*, la revista de divulgación científica más leída en el mundo. Entre sus numerosos libros, *Miscelánea matemática* y una antología de textos, *El escarabajo sagrado*, forman parte de la Biblioteca Científica Salvat.

La explosión de la relatividad

M. Gardner

51





La explosión de la relatividad

Martin Gardner

Biblioteca Científica Salvat



El mundo de los astrónomos y de los físicos ha acogido con sobresalto los recientes descubrimientos de quasars, pulsars y agujeros negros. Ello ha hecho que se incrementara también el interés por la teoría de la relatividad, íntimamente ligada a estos fenómenos astronómicos.
En esta obra, Martin Gardner nos invita, de forma clara, amena y brillante, a un «paseo» por el Universo tal y como nos lo muestran las teorías de Einstein.

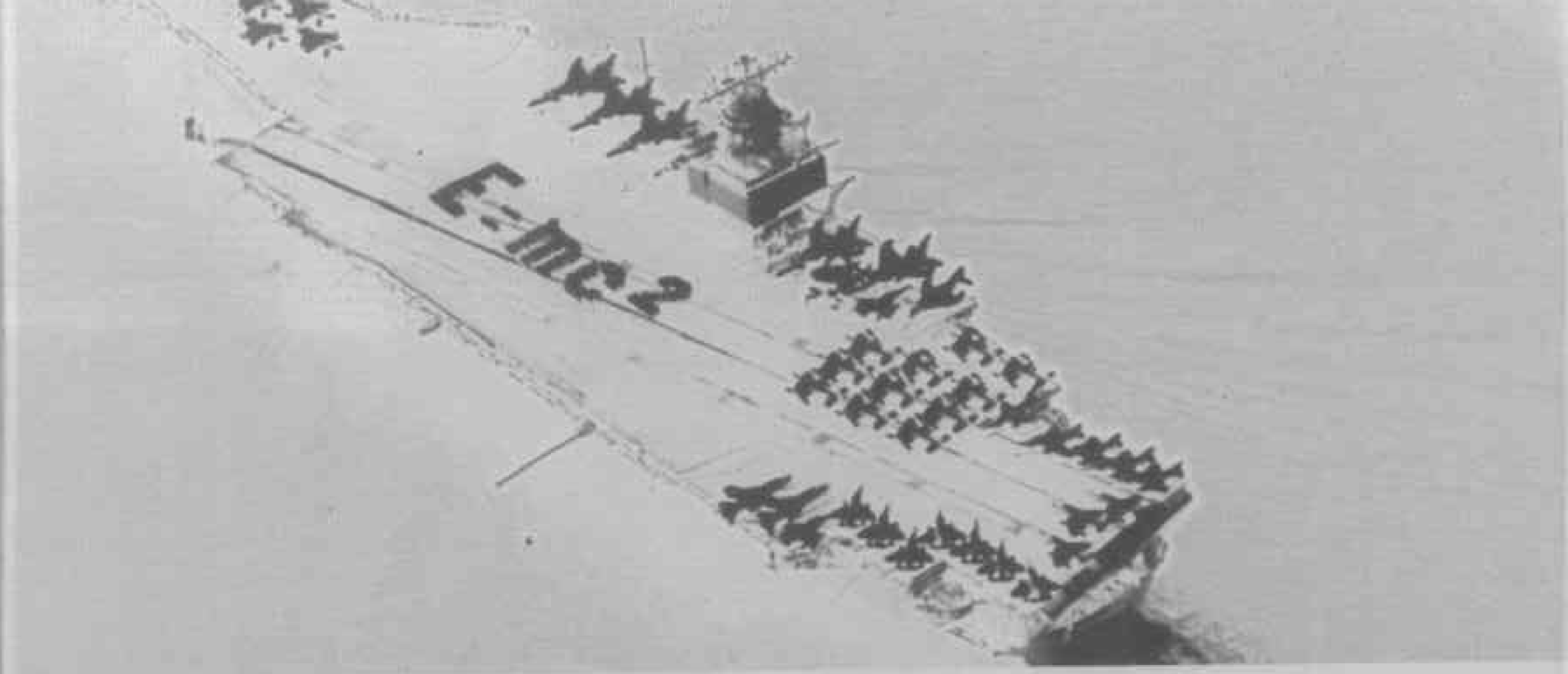
Martin Gardner es uno de los más célebres escritores sobre temas científicos. Durante más de veinte años, Gardner ha tenido a su cargo una sección de matemática en *Scientific American*, la revista de divulgación científica más leída en el mundo. Entre sus numerosos libros, *Miscelánea matemática* y una antología de textos, *El escarabajo sagrado*, forman parte de la Biblioteca Científica Salvat.

La explosión de la relatividad

M. Gardner

51





La explosión de la relatividad

Martin Gardner

Biblioteca Científica Salvat



El mundo de los astrónomos y de los físicos ha acogido con sobresalto los recientes descubrimientos de quasars, pulsars y agujeros negros. Ello ha hecho que se incrementara también el interés por la teoría de la relatividad, íntimamente ligada a estos fenómenos astronómicos.
En esta obra, Martin Gardner nos invita, de forma clara, amena y brillante, a un «paseo» por el Universo tal y como nos lo muestran las teorías de Einstein.

Martin Gardner es uno de los más célebres escritores sobre temas científicos. Durante más de veinte años, Gardner ha tenido a su cargo una sección de matemática en *Scientific American*, la revista de divulgación científica más leída en el mundo. Entre sus numerosos libros, *Miscelánea matemática* y una antología de textos, *El escarabajo sagrado*, forman parte de la Biblioteca Científica Salvat.

La explosión de la relatividad





La explosión de la relatividad

Martin Gardner

Biblioteca
Científica
Salvat



El mundo de los astrónomos y de los físicos ha acogido con sobresalto los recientes descubrimientos de quasars, pulsars y agujeros negros. Ello ha hecho que se incrementara también el interés por la teoría de la relatividad, íntimamente ligada a estos fenómenos astronómicos.
En esta obra, Martin Gardner nos invita, de forma clara, amena y brillante, a un «paseo» por el Universo tal y como nos lo muestran las teorías de Einstein.

Martin Gardner es uno de los más célebres escritores sobre temas científicos. Durante más de veinte años, Gardner ha tenido a su cargo una sección de matemática en *Scientific American*, la revista de divulgación científica más leída en el mundo. Entre sus numerosos libros, *Miscelánea matemática* y una antología de textos, *El escarabajo sagrado*, forman parte de la Biblioteca Científica Salvat.

La explosión de la relatividad





La explosión de la relatividad

Martin Gardner

Biblioteca Científica Salvat